

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 821 681

(21) N° d'enregistrement national : 01 02922

(51) Int Cl⁷ : G 02 F 1/33, H 04 B 10/20

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 02.03.01.

(30) Priorité :

(43) Date de mise à la disposition du public de la
demande : 06.09.02 Bulletin 02/36.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

(60) Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

(71) Demandeur(s) : TEEM PHOTONICS Société ano-
nyme — FR.

(72) Inventeur(s) : VALETTE SERGE.

(73) Titulaire(s) :

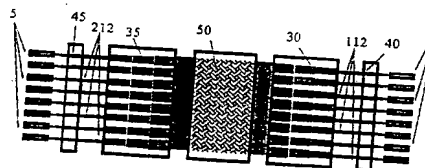
(74) Mandataire(s) : RINUY SANTARELLI.

(54) ROUTEURS OPTIQUES UTILISANT DES MODULES D'AMPLIFICATEUR DE POSITIONS ANGULAIRES.

(57) L'invention propose un dispositif de routage optique permettant de coupler chacune d'une pluralité de N_E voies d'arrivée optique (1) à l'une quelconque d'une pluralité de N_S voies de sortie optique (5) et orienter chacun des faisceaux optiques arrivant par les voies d'arrivée optique vers l'une quelconque des N_S voies de sortie optique, comportant :

- un module d'entrée (40) ayant N_E entrées optiques, apte à mettre en forme chacun des faisceaux arrivant par les voies d'arrivée optique, de façon à obtenir une pluralité de faisceaux optiques mis en forme (112),
- un module de déflexion d'entrée (30) apte à générer pour chacune des entrées un nombre P_{TN} de positions de déflexion angulaire distinctes au moins égal au nombre N_S de voies de sortie optiques,
- un module de liaison (50) apte à rassembler de façon bi-univoque sur P_{TN} points de focalisation spatiale, respectivement, les P_{TN} positions de déflexion angulaire de chacune des entrées, ce module étant apte à générer P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires,
- un module de déflexion de sortie (35) ayant P_{TN} entrées aptes à intercepter les P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires, et apte à générer, à partir des faisceaux optiques intermédiaires, N_S faisceaux de sortie, et

- un module de sortie optique (45) apte à mettre en forme chacun des N_S faisceaux de sortie en sorte de pouvoir les appliquer aux N_S voies de sortie.



FR 2 821 681 - A1



BEST AVAILABLE COPY

1. DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne le routage et le brassage d'informations optiques en provenance d'une pluralité de voies d'arrivée, en particulier transportées par les réseaux de télécommunication à fibres optiques.

L'invention peut s'appliquer à tous les domaines dans lesquels des signaux lumineux transportés ou non par fibres optiques doivent être réorientés et redistribués spatialement.

2. ETAT DE LA TECHNIQUE

L'utilisation de routeurs tout-optique est devenu un énorme enjeu dans les systèmes de télécommunications à fibres optiques du fait de l'accroissement du nombre de connexion à gérer, du nombre de longueurs d'ondes mises en jeu et de l'augmentation des fréquences de modulation des porteuses optiques qui atteignent aujourd'hui 40 Gbit/s.

Cette évolution rend en effet de plus en plus difficile le routage électronique traditionnel (qui nécessite une première conversion optique-électronique puis, après routage électronique, la conversion inverse électronique-optique).

Les solutions actuelles se partagent entre les solutions utilisant l'optique intégrée (Agilent, ATT...) et celles utilisant les microsystèmes optiques appelés

encore MOEMS (pour Micro-Opto-Electro-Mechanical-Système) avec en particulier Lucent et Xross (voir les références) .

L'invention s'inscrit dans cette dernière catégorie avec, comme dans l'art antérieur, l'utilisation favorable (mais non nécessaire) de micro-miroirs réalisés par les techniques de micro-technologies comme moyens de déflexion.

Elle diffère par l'architecture optique permettant de réaliser la fonction de routage et, dans le cas de l'utilisation de micro-miroirs comme moyens de déflexion, par le type et par le mode de fonctionnement des micro-miroirs pouvant être mis en jeu. Elle permet de surmonter la plupart des difficultés rencontrées dans les routeurs de l'art antérieur.

En effet les solutions actuellement étudiées et illustrées dans leur principe de fonctionnement par la figure 1 nécessitent l'utilisation de micro-miroirs à commande analogique et à double partie mobile capables d'orienter les faisceaux optiques défléchis dans toutes les directions de l'espace (angles θ et Φ).

Ces solutions ne réclament donc que deux réflexions sur des miroirs mobiles à commande analogique pour réaliser l'opération de routage. Elles sont souvent mises en oeuvre avec une seule matrice de micro-miroirs analogiques 100 et un miroir de renvoi fixe 105, comme le montre la figure 1 ; les fibres d'entrée 1 et de sortie 5 étant alors regroupées en une seule matrice 110.

Elles paraissent sur le papier extrêmement simples et élégantes mais pèchent à trois niveaux :

- les micro- miroirs à commande analogique et double partie mobile sont difficiles à réaliser technologiquement et les rendements de fabrication de matrices de tels micro-miroirs semblent aujourd'hui très faibles et peu satisfaisants.
- la commande analogique indispensable nécessite des asservissement électroniques très complexes et difficiles à gérer.
- les excursions angulaires de chaque micro-miroir doivent être importantes et d'autant plus grandes que le nombre de points mis en jeu est élevé ,ce qui complique encore la technologie de fabrication.

La solution de l'invention illustrée schématiquement par la figure 2 contourne ces trois difficultés lorsqu'elle met en jeu des cascades de moyens de déflexion de faisceaux optiques MD^1 , MD^2 , MD^3 , ..., MD^I , ..., MD^N composés d'éléments de déflexion de type micro-miroirs digitaux dont les positions de déflexion sont stables et parfaitement reproductibles et qui ne nécessitent aucun asservissement électronique.

La réalisation de tels miroirs est technologiquement plus simple et doit conduire à d'excellents rendements de fabrication.

De plus l'architecture mise en jeu dans laquelle, comme nous le verrons dans la suite de l'exposé, chaque élément de déflexion de la cascade est conjugué optiquement avec le miroir de la cascade qui le précède et qui le suit par une relation objet-image, ce qui assure une excellente stabilité de l'alignement du système.

Elle conduit également à une très grande modularité car les mêmes types de moyens de déflexion (micro-miroirs ou autres) peuvent être utilisés pour réaliser des routeurs de complexité croissante par simple accroissement du nombre d'éléments formant les moyens de déflexion et du nombre de moyens de déflexion (favorablement identiques) de la cascade.

Enfin, elle est compatible, même pour des routeurs de grande complexité, avec l'utilisation de tous moyens de déflexion de faisceaux optiques permettant d'obtenir au moins deux positions de déflexion.

Il faut noter que la mise en œuvre avantageuse de telles cascades suppose de pouvoir coupler efficacement un module optique de déflexion d'entrée et un module optique de déflexion de sortie, ce que l'état de la technique ne permet pas toujours de manière simple et fiable.

3. PRINCIPE MIS EN JEU DANS L'INVENTION

L'objectif général de l'invention est de réaliser un dispositif capable d'orienter les informations transportées par un nombre quelconques de signaux

optiques d'entrées vers un nombre quelconque de sorties, grâce à une structure permettant d'utiliser diverses structures de modules de déflexion.

Elle propose à cet effet un dispositif de routage optique permettant de coupler chacune d'une pluralité de N_E voies d'arrivée optique à l'une quelconque d'une pluralité de N_S voies de sortie optique et orienter chacun des faisceaux optiques arrivant par les voies d'arrivée optique vers l'une quelconque des N_S voies de sortie optique, comportant :

- un module d'entrée ayant N_E entrées optiques, apte à mettre en forme chacun des faisceaux arrivant par les voies d'arrivée optique, de façon à obtenir une pluralité de faisceaux optiques mis en forme avantageusement parallèles,
- un module de déflexion d'entrée apte à générer pour chacune des entrées un nombre P_{TN} de positions de déflexion angulaire distinctes au moins égal au nombre N_S de voies de sortie optiques,
- un module de liaison apte à rassembler de façon bi-univoque sur P_{TN} points de focalisation spatiale, respectivement, les P_{TN} positions de déflexion angulaire de chacune des entrées, ce module étant apte à générer P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires,
- un module de déflexion de sortie ayant P_{TN} entrées aptes à intercepter les P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires, et apte à générer, à partir des faisceaux optiques intermédiaires, N_S faisceaux de sortie avantageusement parallèles, et
- un module de sortie optique apte à mettre en forme chacun des N_S faisceaux de sortie en sorte de pouvoir les appliquer aux N_S voies de sortie.

On appréciera que cette structure générale offre une grande souplesse dans le choix des modules de déflexion qui peuvent donc être du type connu, notamment avec des miroirs mobiles à commande analogique et à configurations multiples, ainsi que du type nouveau précité, en cascade.

L'invention se prête au traitement de divers types de besoins.

Le cas le plus courant à traiter est celui rencontré dans les nœuds des réseaux de télécommunications optiques où les informations transportées par un nombre N_E de fibres optiques d'entrée réparties soit en barrettes de N_E fibres

soit en matrices de $N'_E \cdot N''_E$ fibres doivent être réorientées vers N_S de fibres optiques de sortie réparties soit en barrettes de N_S fibres soit en matrices de $N'_S \cdot N''_S$ fibres.

Toutefois, les voies d'entrée et de sortie peuvent être non seulement des fibres mais aussi l'espace libre, ou des sources telles que des diodes, etc...

L'invention permet en particulier de donner des réponses à différents types de routeurs ou de brasseurs des informations optiques rencontrés dans les systèmes de télécommunications optiques.

- routeur point par point de l'ensemble des informations transportées par une fibre optique quelconque d'entrée FO_{Ie} (ou $FO_{Ie,Je}$ dans le cas de barrettes) vers une fibre quelconque de sortie FO_{Is} (ou $FO_{Is,Js}$ dans le cas de barrettes).

Plusieurs canaux d'informations étant en général transportés par une même fibre et par différentes longueurs d'ondes optiques dans les systèmes DWDM ('Dense Wavelength Division Multiplexing'), il est donc indispensable que le dispositif de routage puisse réaliser cette opération de routage point par point indépendamment des longueurs d'ondes transportées .

Bien entendu , cette remarque s'applique si le multiplexage mis en jeu utilise d'autres paramètres que la longueur d'onde (par exemple la polarisation lumineuse ou la longueur temporelle de trains d'informations optiques).

Ce type de routeur 150 est illustré schématiquement par la figure 3a avec 16 fibres d'entrée 1 (disposées en barrettes pour raison de simplification) transportant 4 longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ chacune et dont les informations transportées peuvent être orientées grâce au routeur 150 vers n'importe laquelle des 16 fibres de sortie 5.

L'architecture général du routeur point à point de l'invention est représentée figure 2.

- routeur diviseur de puissance dans lequel l'information transportée par chaque fibre d'entrée FO_{Ie} et en général regroupées en barrettes est partagée (favorablement à l'identique) en K parties (chaque partie

transportant par exemple une fraction $1/K$ de la puissance transportée dans la fibre F_{ie}) pouvant chacune être orientée vers une fibre de sortie distincte indexée $FO_{is,js}$ dans le cas d'une répartition matricielle (si la puissance optique de chaque fibre d'entrée est divisée en K parties, il faudra bien entendu disposer d'au moins $K \cdot N_E = N_S$ fibres de sortie).

Ce type de routeur est illustré schématiquement par la figure 3b avec 4 fibres d'entrée 1 transportant 4 longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ chacune et dont les informations transportées , partagées en puissance par 4 diviseurs 4 voies 60 peuvent être orientées grâce au routeur 150 vers n'importe laquelle des 16 ($4 \cdot 4$) fibres de sortie 5.

- routeur démultiplexeur de longueurs d'ondes dans lequel chacun des canaux de longueur d'onde quelconque λ_L transportée par n'importe quelle fibre d'entrée FO_{ie} en général regroupées en barrettes peut être orientée de façon distincte vers n'importe quelle fibre de sortie $FO_{is,js}$ en général regroupées en matrices . Si chaque fibre d'entrée transporte L canaux de longueurs d'ondes distinctes , il y aura donc au total $L \cdot N_E$ canaux distincts et il faudra donc disposer d'au moins $N_S = L \cdot N_E$ fibres de sortie.

Ce type de routeur est illustré figure 3c avec 4 fibres d'entrée 1 véhiculant 4 longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ chacune et dont les 16 canaux d'informations (4 longueurs d' ondes pour chacune des 4 fibres d'entrée) sont séparées par le démultiplexeur 70 puis orientés par le routeur 150 vers n'importe laquelle des 16 fibres de sortie 5.

- routeur démultiplexeur-multiplexeur de longueurs d'ondes dans lequel les L canaux de longueur d'ondes distinctes λ_L transportés par chacune des N_E fibres d'entrée sont mélangés et réorientés vers un nombre N_S équivalent de fibres optiques de sortie transportant également chacune L canaux de longueurs d'ondes distinctes.

Ce type de routeur est illustré figure 3d avec 4 fibres d'entrée 1 véhiculant chacune 4 longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ et dont les 16 canaux d'informations (4 longueurs d' ondes pour chacune des 4 fibres

d'entrée) sont séparées par le démultiplexeur 70, ré-orientés par le routeur 150 puis remultiplexés par le multiplexeur 80 vers les 4 fibres de sortie 5 recevant donc chacune 4 canaux de longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ issue de l'une quelconque des fibres d'entrée.

De manière plus générale le dispositif de l'invention peut effectuer l'ensemble des opérations de routage rencontrées dans les systèmes de télécommunications optiques de type DWDM et en particulier enlever ou rajouter une ou des longueurs d'ondes transportées par une ou plusieurs fibres optiques quelconques d'un nœud de réseau pour les redistribuer dans une ou plusieurs fibres optiques du même nœud de réseau (fonction 'add and drop' généralisée).

Comme signalé précédemment, ce type de fonctionnalité peut être appliquée à d'autres paramètres optiques que la longueur d'onde et en particulier la polarisation, la durée des impulsion lumineuses.

Dans le cas des routeurs point par point (c'est à dire sans multiplexage de variables optiques), le principe général mis en jeu dans l'invention peut être décrit par la succession des sous-systèmes suivants illustrés par la figure 2.

- un sous-système d'entrée 40 de mise en forme des faisceaux optiques issus des N_E fibres optiques d'entrée 1, en particulier en terme d'ouverture numérique $\Delta\varphi_E$ de façon à adapter cette ouverture numérique au système de déflexion décrit par la suite (condition de séparation angulaire des différents faisceaux défléchis). Ce sous-système d'entrée génère donc N_E faisceaux optiques 112, d'ouverture adaptée, tous parallèles à l'axe optique du dispositif. Ce sous-système 40 sera désigné par $MIFO^E$ (pour module de Mise en Forme d'Entrée).
- un premier sous-système de déflexion des faisceaux optiques 30 permettant de générer, à partir de chacun des N_E faisceaux optiques mis en forme par le sous-système d'entrée 40, N_S positions de déflexion angulaire. Ce sous-

système met en jeu le Module d'Amplification de Position Angulaire (en abrégé MAPA) décrit dans l'invention précédente (demande de brevet du même jour) et qui utilise au moins une cascade de moyens de déflexion de faisceaux optiques MD^{1E} , MD^{2E} , ... MD^{1E} ,... MD^{NE} . Ce sous-système sera désigné par $MAPA^E$ ('E' pour Entrée)

- un module de liaison MOLI (pour MOdule de Liaison) 50 qui permet de relier de façon biunivoque chacune des N_S positions de déflexion angulaire données par chacun des N_E éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} du sous- système 30 aux N_S éléments du premier moyen de déflexion MD^{1S} du second sous-système de déflexion des faisceaux optiques 35 .
- un second sous-système de déflexion 35 permettant de réorienter les différents faisceaux optiques effectivement défléchis par le premier sous-système de déflexion et de former ainsi N_S faisceaux optiques 212 à nouveau parallèles à l'axe optique du système . Ce second sous-système de déflexion met en jeu un second module MAPA favorablement identique au premier et désigné par $MAPA^S$ ('S' pour Sortie).Ce second module $MAPA^S$ utilise au moins une cascade de moyens de déflexion de faisceaux optiques MD^{1S} , MD^{2S} , ... MD^{1S} ,... MD^{NS}
- un sous-système de sortie 45 de mise en forme des N_S faisceaux optiques de sortie 212, rendus parallèles par le second sous-système de déflexion, et dont la fonction est de réinjecter ces N_S faisceaux optiques de sortie 212 dans les N_S fibres optiques de sortie 5 avec le maximum d'efficacité. Ce sous- système sera désigné par $MIFO^S$.

Dans le cas des routeurs diviseur de puissance, des routeurs démultiplexeur- multiplexeur et des routeurs démultiplexeur il faut insérer respectivement dans la chaîne précédente les sous-systèmes de division de puissance 60 ou de démultiplexage 70 en entrée et le sous-système de multiplexage 80 en sortie. Suivant les types de sous-systèmes choisis

précédemment, ceux-ci pourront être insérer avant ou après les sous-systèmes d'entrée ou de sortie de mise en forme des faisceaux optiques.

4.DESCRPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Des objets, caractéristiques et avantages de l'invention ressortent de la description qui suit, donnée à titre d'exemple illustratif non limitatif, en regard des dessins annexés sur lesquels :

- La figure 1 montre une représentation schématique des routeurs optiques de type 'espace libre' actuellement développés.
- La figure 2 montre une représentation schématique du routeur optique de l'invention.
- Les figures 3a à 3d donnent une représentation schématique des différents routeurs optiques pouvant être réalisés avec l'architecture de l'invention.
- Les figures 4a et 4b illustrent les configurations possibles du sous-système de mise en forme des faisceaux pour 2 inclinaisons ($\varphi = 0$ et $\varphi \neq 0$).
- La figure 5 donne un exemple de réalisation possible du sous-système de déflexion d'entrée.
- Les figures 6a , 6b , 6c , 6d , 6e , 6f illustrent le principe de fonctionnement du module de liaison et différentes configurations possibles permettant de réduire l'encombrement de ce module.
- La figure 7 donne un exemple de réalisation possible d'un routeur point à point selon l'invention.
- La figure 8 donne un exemple de réalisation possible d'un routeur diviseur de puissance utilisant comme diviseur un composant optique intégré.
- La figure 9 donne un exemple de réalisation possible d'un diviseur de puissance utilisant comme diviseur un composant optique espace libre.
- La figure 10 donne un exemple de réalisation possible d'un démultiplexeur ou démultiplexeur - multiplexeur de longueurs d'ondes utilisant un composant optique intégré de type AWG.

- La figure 11 donne un exemple de réalisation possible de l'élément démultiplexeur ou multiplexeur utilisant un composant optique espace libre.
- La figure 12 donne une représentation schématique d'un routeur démultiplexeur- multiplexeur selon l'invention.
- Les figures 13a et 13b donnent une représentation schématiquement de moyens de contrôle utilisables dans l'invention.
- Les figures 14a, 14b, 14c, 14d donnent des exemples de réalisation possible de routeurs point à point selon l'invention et dont la complexité (nombre de fibres en entrée et sortie) est croissante. Ces différents exemple mettent donc en jeu un nombre de moyens croissant 2 (figure 14a), 3 (figure 14b), 4 (figure 14c), 5 (figure 14d) de moyens de déflexion MD^{IE} et MD^{IS}.
- La figure 15 est une vue schématique d'un routeur selon l'invention dans lequel des matrices ou barrettes comportent à la fois une partie du module de déflexion d'entrée et une partie du module de déflexion de sortie ;
- La figure 16 est une vue d'une telle matrice, et
- La figure 17 est un schéma correspondant à une optimisation en fonction du 'waist'.

4.1 routeur optique point par point

C'est le dispositif de base de l'invention dont la fonctionnalité est représentée schématiquement figure 3a. Il est composé des différents sous-systèmes, évoqués au paragraphe 3 et illustrés figure 2, que nous allons décrire plus en détail .

- sous-système d'entrée de mise en forme des faisceaux optiques

Le faisceau lumineux émis en sortie d'une fibre optique peut être assimilé à un faisceau gaussien dont la répartition d'intensité suit à peu près une loi de la forme

$$I(x,y,z) = e^{-(x^2 + y^2) / \omega(z)^2}$$

$\omega(z)$ représente donc la demi-largeur à $1/e$ de cette répartition d'intensité suivant deux axes orthogonaux Ox et Oy situés dans un plan de coordonnées z perpendiculaire aux faisceaux lumineux. Les faisceaux gaussiens sont intéressants car ils ont la propriété de rester gaussiens au cours d'une succession de conjugaisons optiques. Dans de tels faisceaux, $\omega(z)$ passe par une valeur minimum appelée 'waist' (resserrement ou 'taille' en anglais) qui détermine les caractéristiques de propagation et en particulier la divergence du dit faisceau. Si ω_1 est la valeur du waist d'un faisceau gaussien F_1 , sa divergence angulaire $\delta\Phi_1$ totale sera :

$$\delta\Phi_1 = 2\lambda / \Pi \cdot \omega \quad \text{avec } \Pi = 3.1416\dots$$

Au cours d'une conjugaison optique par une lentille ou un miroir de focale f_1 , le 'waist' ω_1 devient ω_{1+1} avec :

$$\omega_{1+1} = \lambda \cdot f_1 / \Pi \cdot \omega_1$$

Le système de mise en forme d'entrée **40** est représenté schématiquement figure 4a dans une configuration en ligne où l'angle d'inclinaison φ des composants sur l'axe optique est égal à 0 et figure 4b dans le cas général des systèmes à miroirs pour lesquels φ est différent de 0 et dans lesquels, pour conserver une parfaite symétrie entre les différents faisceaux optiques mis en jeu, chaque sous-système doit globalement être incliné du même angle φ .

Ce système de mise en forme doit servir à collimater les différents faisceaux optiques **112** issue des fibres d'entrée et incidents sur les différents éléments du premier moyen de déflexion MD^{1E} du Module d'Amplification de Position Angulaire MAPA (cas de la figure 5). Il doit aussi assurer le parallélisme de tous ces faisceaux **112** et déterminer leur ouverture angulaire afin qu'après déflexion par les différents éléments du premier moyen de déflexion chaque faisceau défléchis soient angulairement séparées de ces voisins. Si $\delta\theta_1$ est la déflexion angulaire entre deux faisceaux adjacents défléchis par les premiers éléments

de la cascade de micro-miroirs et $\delta\Phi_{FIE}$ l'ouverture angulaire de ces faisceaux d'entrée, cette condition s'écrit :

$$\delta\Phi_{FIE} < \delta\theta_1$$

C'est cette condition qui sert à déterminer la focale f_{MFE} des éléments du sous-système de mise en forme d'entrée car:

$$\delta\Phi_{FIE} = 2\lambda / \Pi \cdot \omega_{FIE}$$

et

$$\omega_{FIE} = \lambda \cdot f_{MFE} / \Pi \cdot \omega_{FOE}$$

où ω_{FOE} représente la valeur du 'waist' 91 des faisceaux émis par les fibres optiques d'entrée 1 et ω_{FIE} la valeur du 'waist' 92 des faisceaux optiques collimatés par les moyens de mise en forme d'entrée 40

En combinant les équations précédentes on obtient :

$$f_{MFE} > 2\omega_{FOE} / \delta\theta_1$$

Application numérique: $\omega_{FOE} = 4\mu\text{m}$ et $\delta\theta_1 = 1^\circ$ conduisent à $f_{MFE} > 460 \mu\text{m}$.

En pratique, f_{MFE} sera choisie assez nettement plus grand (par exemple 1 mm dans l'exemple donné) pour disposer de faisceaux optiques défléchis nettement séparés angulairement.

Si le nombre de fibres optiques d'entrée est N_E , le sous- système d'entrée devra donc avoir N_E éléments optiques de mise en forme 41.

Ces éléments, qui seront favorablement des micro-lentilles (cas illustré figures 4a et 4b) ou des micro-miroirs de focale f_{MFE} , donneront N_E faisceaux parallèles 112 d'ouverture $\delta\Phi_{FIE}$ incidents respectivement sur N_E éléments de déflexion du premier moyen de déflexion MD^{1E} (10) de la cascade. Bien entendu la configuration de ces différents groupes de N_E éléments sera identique (élément unique ou barrettes ou matrices d'éléments d'espacements identiques regroupant les éléments homologues au sein des diverses lignes du module considéré).

Il est donc possible d'indexer chaque élément composant le module d'entrée dans le cas le plus général (matrice de fibres de $N'_E \cdot N''_E = N_E$) par deux indices l_e et J_e , l_e étant l'indice ligne (variant de 1 à N'_E) et J_e l'indice colonne (variant de 1 à N''_E) des différentes matrices d'éléments .

Chaque fibre optique d'entrée 1 sera donc indexée FO_{l_e, J_e}^E .

Chaque élément des moyens de mise en forme 40 des faisceaux optiques d'entrée sera indexé MF_{l_e, J_e}^E .

Chaque faisceau optique 112 incident sur les éléments du premier moyen de déflexion d'entrée MD^{1E} sera indexé Fl_{l_e, J_e} .

Chaque élément de déflexion du premier moyen de déflexion d'entrée MD^{1E} (10) de la cascade sera indexé ED_{l_e, J_e}^{1E} et ainsi de suite, ED_{l_e, J_e}^{2E} pour le second moyen de déflexion MD^{2E} (11) , ... ED_{l_e, J_e}^{NE} pour le moyen MD^{NE} .

Il y a donc correspondance biunivoque entre chacune des fibres d'entrée et chacun des éléments des sous- systèmes . Pour des raisons de simplicité évidente il est naturel de choisir des sous- systèmes de dimensionnement géométrique identique (espacement des éléments des différentes barrettes suivant l'axe commun ou des éléments des différentes matrices suivant les deux axes communs pour tous les sous-systèmes).

• sous- système de déflexion d'entrée et de multiplication du nombre de positions angulaires potentiellement prises par les faisceaux optiques d'entrée :

Ce sous-système 30 illustré par exemple par le schéma de la figure 5 utilise un premier module MAPA d'entrée $MAPA^E$ décrit en détail dans la demande de brevet du même jour, comportant une cascade de N moyens de déflexion d'entrée MD^{1E} (10) , MD^{2E} (11) , ... MD^{IE} , ... MD^{NE} telle que :

- deux moyens consécutifs MD^{I+1E} et MD^{IE} de la cascade soient conjugués optiquement deux à deux avec le grossissement $G_{I+1, I}$ par des moyens optiques de conjugaison MCO^{IE} ,
- le nombre total de positions de déflexion angulaire P_{NT} **potentiellement** générées par chaque élément ED_{l_e, J_e}^{NE} du dernier moyen de déflexion MD^{NE}

soit au moins égal au nombre N_s de fibres de sortie et configuré dans une configuration géométrique homothétique de celle des fibres de sortie (répartition linéaire de point de déflexion si les fibres de sorties sont réparties en barrette linéaire, matrice de points de déflexion si les fibres de sortie sont réparties en matrice).

Potentiellement signifie que chaque élément $ED_{le,Je}^{NE}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NE} de la cascade des moyens de déflexion est calculé pour fournir P_{TN} positions de déflexion angulaire distinctes mais que parmi ces P_{TN} positions, une seule (différente pour chacun des éléments) sera effectivement prise par le faisceau lumineux attaché à chaque élément $ED_{le,Je}^{NE}$.

On peut aussi dire que, pour chaque entrée du module, il y a une ligne comportant une cascade de moyens individuels, les moyens individuels qui sont homologues au sein de ces lignes étant regroupés au sein des moyens précités.

En sortie du sous-système de déflexion d'entrée, il ne peut donc exister qu'un seul faisceau lumineux effectivement défléchi par élément $ED_{le,Je}^{NE}$, et donc au total N_E faisceaux défléchis ayant chacun une position de déflexion angulaire distincte prise parmi les P_{TN} positions de déflexion potentielles que peuvent fournir chacun des éléments $ED_{le,Je}^{NE}$. Le nombre P_{TN} pourra être plus grand que N_E soit parce que le sous système de déflexion ne permet de générer que certaines valeurs particulières (par exemple multiples de 2 ou de 4 comme se sera en général le cas avec les modules MAPA décrits dans l'invention précédente) soit parce que le nombre de fibres de sortie N_s est plus grand que le nombre de fibres d'entrée N_E afin d'assurer une meilleure flexibilité au système de routage (redondance ou mise en attente de nouvelles lignes). Cette remarque s'applique d'ailleurs au niveau de l'entrée où certaines des N_E fibres d'entrée peuvent être en attente et donc de manière temporaire ne pas transporter d'informations pour par exemple assurer une redondance en cas de panne de certaines voies.

Le grossissement $G_{i,i+1}$ réalisé par les moyens de conjugaison optique est donné par la formule générale :

$$G_{i,i+1} = P_i \cdot (P_{i+1} - 1) / (P_i - 1)$$

dans laquelle P_i et P_{i+1} représentent le nombre de positions angulaires pouvant être prises par les éléments de déflexion des moyens de déflexion MD^{iE} et MD^{i+1E} . En particulier (demande de brevet du même jour), si les différents moyens de déflexion mis en jeu sont identiques $P_i = P_{i+1} = P$ pour toutes valeurs de i , on obtient :

$$G_{i,i+1} = P$$

Le nombre total P_{TN} de positions de déflexion angulaire en sortie de chacun des éléments est :

$$P_{TN} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_i \cdot \dots \cdot P_N$$

ou, si $P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_N$:

$$P_{TN} = P^N$$

La figure 5 montre une représentation possible du sous-système de déflexion de l'invention dans le cas d'un module MAPA comportant une cascade de 4 moyens de déflexion 10, 11, 12, 13 disposés en barrettes de chacun 4 éléments de déflexion (il y a donc 4 lignes, rectilignes ou non). Les moyens optiques de conjugaison 20, 21, 22 comportent donc aussi 4 éléments et sont disposés dans une configuration objet-image de grossissement $G_{i,i+1} = 2$ qui signifie que dans l'exemple de la figure 5 les éléments de déflexion de type micro-miroirs peuvent chacun présenter $P = 2$ positions angulaires autour d'au moins un axe de direction commune pour tous les éléments. Dans le cas particulier de la figure 5 où le nombre de moyens de déflexion est égal à 4 et $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P = 2$, chacun des éléments de chaque moyen de déflexion MD^{iE} est donc capable de générer pour chaque faisceau incident 2 faisceaux défléchis. Il y aura donc en sortie de chacun des éléments des moyens de déflexion MD^{1E} (10), MD^{2E} (11), MD^{3E} (12), MD^{4E} (13) respectivement 2, 4, 8, 16 faisceaux lumineux potentiellement défléchis (situés dans le plan de la figure 5 si on suppose que la direction de rotation commune des éléments de déflexion de type micro-miroirs est perpendiculaire à ce plan).

La multiplication du nombre de ces faisceaux défléchis potentiels 113 , 114 ,115 ... à partir des faisceaux incidents 112 sur les premiers éléments du moyens de déflexion MD^{1E} (10) est symbolisée par une largeur croissante des traits représentant ces différents faisceaux défléchis en sortie de chaque étage de la cascade .

Dans le cas le plus général d'une répartition matricielle , chaque élément $ED^{NE}_{I_e, J_e}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NE} générera une matrice de P_{TN} positions de déflexion angulaire d'au moins N'_S lignes et N''_S colonnes si la répartition des fibres de sortie est une matrice de $N'_S \cdot N''_S$ fibres .

Pour simplifier et sans que cela ne nuise à la généralité de l'invention , on supposera que le nombre de positions de déflexion générées par chaque élément $ED^{NE}_{I_e, J_e}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NE} est égal à $N'_S \cdot N''_S$.

Il faut noter ici que dans un routeur point à point le nombre N_S de fibres optiques de sortie peut être supérieur ou égal au nombre N_E de fibres d'entrée pour les besoins de redondance ou d'anticipation évoqués plus haut mais comme une fibre d'entrée ne peut , dans ce type de routeur , être connectée qu'à une seule fibre de sortie il ne peut pas y avoir plus de N_E fibres parmi les N_S de sortie transportant réellement des informations.

Les $N'_S \cdot N''_S$ valeurs de la matrice de positions de déflexion angulaire générées par chaque élément $ED^{NE}_{I_e, J_e}$ en sortie du premier module $MAPA^E$ peuvent être indexées $\theta^E_{I_s, J_s, I_e, J_e}$. I_s désignant l'indice ligne et J_s l'indice colonne de cette matrice de déflexion angulaire ; I_e et J_e désignant l'élément $ED^{NE}_{I_e, J_e}$ dont sont issus les faisceaux de la matrice de position angulaire .

Il y a donc au total $N'_S \cdot N''_S \cdot N'_E \cdot N''_E$ positions de déflexion angulaire potentielles en sortie du premier module $MAPA^E$. Ces positions de déflexion sont potentielles car dans une configuration donnée de la cascade des moyens de déflexion , chaque élément (parmi les $N'_E \cdot N''_E$) du module $MAPA^E$ d'entrée ne génère qu'une position angulaire parmi les $N'_S \cdot N''_S$ possibles . Cette position est différente pour chacun des éléments de déflexion car dans un routeur point à point une fibre d'entrée n'est , dans une configuration donnée , connectée qu'à une et une seule fibre de sortie .

Si $N'_E \cdot N''_E = N'_S \cdot N''_S$ (cas le plus classique) , c'est à dire si le nombre de fibres d'entrée est égal au nombre de fibres de sortie , l'ensemble des positions de déflexion angulaire potentielles est **effectivement occupée** par un des $N'_E \cdot N''_E$ faisceaux incidents $Fl_{le,Je}$ en sortie du premier module $MAPA^E$ et chacun des $N'_E \cdot N''_E$ éléments $ED^{NE}_{le,Je}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NE} de ce module défléchit le faisceau optique incident $Fl_{le,Je}$ qui lui correspond suivant une et une seule des $N'_S \cdot N''_S$ (= $N'_E \cdot N''_E$) positions angulaires potentielles $\theta^E_{ls,Js,le,Je}$.

Si $N'_S \cdot N''_S$ est supérieur à $N'_E \cdot N''_E$ certaines positions angulaires (leur nombre étant égal à la différence $N'_S \cdot N''_S - N'_E \cdot N''_E$) ne sont effectivement pas occupées et certaines fibres de sortie ne seront pas connectées à une fibre d'entrée dans une configuration de routage donnée

(ces fibres non connectées peuvent être par exemple des fibres de secours ou des fibres en attente pour anticiper une augmentation future du nombre de fibres optiques d'entrée) .

Pour simplifier la présentation , on supposera dans la suite que $N'_E \cdot N''_E = N'_S \cdot N''_S$.

Il faut donc maintenant faire correspondre de manière biunivoque chacune des $N'_S \cdot N''_S$ positions angulaires différentes $\theta^E_{ls,Js,le,Je}$ générées par chacun des éléments $ED^{NE}_{le,Je}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NE} du premier module $MAPA^E$ aux différents éléments $E^{1E}_{ls,Js}$ du premier moyen de déflexion MD^{1S} du second sous-système de déflexion $MAPA^S$.

C'est la fonction du second sous-système clé de l'invention , le module de liaison MOLI .

- **module de liaison**

Le module de liaison 50 doit réaliser la correspondance biunivoque entre les $N'_S \cdot N''_S$ positions de déflexion angulaire et les $N'_S \cdot N''_S$ éléments de déflexion $ED^{1S}_{ls,Js}$ du premier moyen de déflexion MD^{1S} du sous-système de sortie $MAPA^S$.

Son principe de fonctionnement est illustré par la figure 6a en représentation planaire et par la figure 6b dans une perspective qui permet de mieux appréhender le fonctionnement du module de liaison dans les configurations matricielles (matrice de 4 éléments sur la figure 6b) des différents sous-systèmes .

Pour des raisons de compréhension , les modules de liaison des figures 6a et 6b mettent en jeu des moyens optiques et de déflexion en ligne perpendiculaires à l'axe optique du système ($\varphi = 0$) qui suppose l'utilisation de moyens de déflexion non réfléchifs . Le système de l'invention qui utilisent favorablement des miroirs comme moyens de déflexion implique $\varphi \neq 0$. Cette particularité nécessite le plus souvent des adaptations d'architecture du module de liaison examinées plus loin , mais qui ne modifient en rien le principe de base sur lequel repose le module MOLI que nous allons décrire maintenant .

Tous les faisceaux potentiellement issus des différents éléments $ED_{le,Je}^{NE}$ avec un angle de déflexion $\theta_{ls,js,le,je}^E$ dont les **indices ' ls,Js '** sont **identiques** sont défléchis suivant des **directions parallèles** par construction (les cascades d'éléments $ED_{le,Je}^{1E}$, $ED_{le,Je}^{2E}$... $ED_{le,Je}^{NE}$ sont toutes identiques et donnent donc des matrices de faisceaux défléchis identiques) . Ils doivent pouvoir converger vers le même élément $ED_{ls,js}^{1S}$ du premier moyen de déflexion MD^{1S} du sous-système de sortie MAPA^S . Cette fonctionnalité peut être réalisée par un moyen optique de focalisation MOF désigné par 55 sur la figure 6a .

Ce moyen optique 55 peut être constitué de **une ou plusieurs lentilles** ou **d'un ou de plusieurs miroirs** (par exemple paraboliques) . Il focalise **l'ensemble** des faisceaux optiques $FD_{ls,js,le,je}^E$ potentiellement défléchis (par les éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} (15) du sous-système de déflexion d'entrée MAPA^E) avec une déflexion angulaire $\theta_{ls,js,le,je}^E$ de mêmes indices ls,Js vers le même élément $ED_{ls,js}^{1S}$ du premier moyen de déflexion MD^{1S} , 16 , du sous-système de déflexion de sortie MAPA^S si celui-ci est **situé dans son plan focal image 52** .

L'ensemble des faisceaux optiques focalisés par le moyen optique 55 et correspondant aux différents faisceaux défléchis $FD_{ls,js,le,je}^E$ sera désigné par $FDF_{ls,js,le,je}^S$.

La focale F_{ML} du moyen optique du module MOLI est calculée de telle façon que le point de convergence des différents faisceaux défléchis et focalisés $FDF_{Is,Js,Ie,Je}^S$ de même indice Is,Js coïncide avec le centre de l'élément $ED_{Is,Js}^{1S}$ comme le montre schématiquement les figures 6a et 6b .

En général les moyens de déflexion mis en jeu dans les deux sous-systèmes de déflexion d'entrée et de sortie seront identiques et généreront des positions angulaires identiques ; il est donc nécessaire que le module de liaison préserve cette symétrie et en particulier que les angles $\theta_{Is,Js,Ie,Je}^S$ des faisceaux optiques focalisés $FDF_{Is,Js,Ie,Je}^S$ sur les éléments $ED_{Is,Js}^{1S}$ du moyens de déflexion MD^{1S} prennent une gamme de valeurs identiques à celle des angles $\theta_{Is,Js,Ie,Je}^E$ des faisceaux correspondants $FD_{Is,Js,Ie,Je}^E$ en sortie des éléments $ED_{Ie,Je}^{NE}$ du moyen de déflexion MD^{NE} .

Cette condition est réalisée si le moyen de déflexion MD^{NE} , 15 , est placé dans le **plan focal objet 51** du moyen optique de focalisation 55 comme le montre la figure 6a .

Comme évoqué plus haut , plusieurs adaptations particulières du module MOLI doivent ou peuvent être mis en œuvre pour prendre en compte la configuration en général repliée du système ou des valeurs particulières des paramètres de fonctionnement comme la valeur de l'écart angulaire entre les différentes positions de déflexion données par le sous-système $MAPA^E$.

La figure 6c illustre la situation d'un système 'replié' dont les différents moyens optiques sont inclinés d'un angle $\varphi \neq 0$ par rapport à l'axe optique et ou , pour conserver la symétrie recherchée , le moyen optique MOF est incliné par rapport à l'axe optique du même angle φ (choisi à 45° sur la figure) .

Sur les figures 6a et 6c de configuration planaire le nombre d'éléments ED^{NE} et ED^{1S} mis en jeu ainsi que le nombre de positions de déflexion angulaire θ^E et θ^S attachées à chacun de ces éléments ont été choisis égaux à 4 par simplification ; les derniers moyens de déflexion du module MAPAd'entrée et les premiers moyens de déflexion du module MAPA de sortie sont désignés par 15 et 16 et localisés respectivement dans les plans focaux objet et image 51 et

52 . Les 4 valeurs angulaires des positions de déflexion en entrée et en sortie du module de liaison 50 attachées à chacun des éléments ED^{NE} et ED^{1S} sont désignées en indicage simplifié respectivement par $\theta_{11}^E, \theta_{21}^E, \theta_{31}^E, \theta_{41}^E$ et $\theta_{11}^S, \theta_{12}^S, \theta_{13}^S, \theta_{14}^S$ pour les éléments ED^{NE}_1 et $ED^{1S}_1, \theta_{12}^E, \theta_{22}^E, \theta_{32}^E, \theta_{42}^E$ et $\theta_{21}^S, \theta_{22}^S, \theta_{23}^S, \theta_{24}^S$ pour les éléments ED^{NE}_2 et $ED^{1S}_2, \dots, \theta_{14}^E, \theta_{24}^E, \theta_{34}^E, \theta_{44}^E$ et $\theta_{41}^S, \theta_{42}^S, \theta_{43}^S, \theta_{44}^S$ pour les éléments ED^{NE}_4 et ED^{1S}_4 . Sur les figures 6a et 6c seules sont repérées les valeurs angulaires $\theta_{14}^E, \theta_{24}^E, \theta_{34}^E, \theta_{44}^E$ et $\theta_{41}^S, \theta_{42}^S, \theta_{43}^S, \theta_{44}^S$ des positions de déflexion attachées aux éléments respectifs ED^{NE}_4 et ED^{1S}_4 afin de ne pas surcharger l'illustration .

Bien évidemment , toutes les valeurs θ^E et θ^S sont telles que tous les θ_{IJ}^E de même indice I et que tous les valeurs θ_{IJ}^S de même indice J sont égales du fait des positions des éléments ED^{NE} et ED^{1S} respectivement dans les plans focaux objet 51 et 52 et image du moyen optique de focalisation 55 .

La position des centres des éléments $ED^{NE}_{le,Je}$ et $ED^{1S}_{ls,Js}$ des moyens de déflexion respectifs MD^{NE} et MD^{1S} est entièrement définie par la valeurs des angles de déflexion angulaire $\theta_{ls,Js,le,Je}^E$

Dans le plan de la figure , une relation mathématique simple permet de calculer ces positions définies par les distances respectives $d_{le,Je}^{NE}$ et $d_{ls,Js}^{1S}$ (plus simplement indicés $d_{1e}, d_{2e}, d_{3e}, d_{4e}$ et $d_{1s}, d_{2s}, d_{3s}, d_{4s}$ sur les figures 6a et 6c) aux centres O^{NE} et O^{1S} (désignés simplement par O_e et O_s sur les mêmes figures) des moyens de déflexion MD^{NE} et MD^{1S} en fonctions des angles φ et $\theta_{ls,Js,le,Je}^E$ (définis algébriquement par rapport à la direction de l'axe optique du système) :

$$d_{le,Je}^{NE} = F_{ML} \cdot \text{tg} \theta_{ls,Js,le,Je}^E / (\cos \varphi + \sin \varphi \cdot \text{tg} \theta_{ls,Js,le,Je}^E)$$

$$d_{ls,Js}^{1S} = F_{ML} \cdot \text{tg} \theta_{ls,Js,le,Je}^E / (\cos \varphi - \sin \varphi \cdot \text{tg} \theta_{ls,Js,le,Je}^E)$$

On remarque que les distances $d_{le,Je}^{NE}$ et $d_{ls,Js}^{1S}$ conduisent à des écarts non constants entre les positions des centres $O_{le,Je}^{NE}$ et $O_{ls,Js}^{1S}$ des éléments $ED^{NE}_{le,Je}$ et $ED^{1S}_{ls,Js}$ et ceci même dans le cas ou $\varphi = 0$. Cette situation est bien entendu la même pour l'ensemble des moyens optiques d'entrée et de sortie

mis en jeu dans le système (moyens de déflexion et moyens de conjugaison associés , moyens de mise en forme , fibres optiques ...) et qui sont positionnés respectivement par rapport aux moyens de déflexion MD^{NE} et MD^{1S} par translation parallèlement à l'axe optique du système .

Notons aussi qu'il y a seulement retournement par rapport à l'axe optique du système entre les positions des éléments constitutifs des différents moyens optiques des sous-systèmes d'entrée et de sortie qui peuvent donc être de configurations identiques .

Deux points doivent maintenant être pris en compte pour l'obtention d'un système de routage techniquement réalisable : l'encombrement et les aberrations optiques .

L'application des formules mathématiques permettant de calculer $d_{le,Je}^{NE}$ et $d_{ls,Js}^{1S}$ montre que pour des valeurs typiques de l'ordre de quelques millimètres entre les positions des centres O^{NE} et O^{1S} et des écarts entre les positions de déflexion angulaire de l'ordre de 10^{-3} radians

(atteintes typiquement avec des miroirs uniaxes présentant deux positions de déflexion séparées de 8.10^{-3} radians et une cascades de par exemple 5 moyens de déflexion donnant 32 positions de déflexion angulaire disposées linéairement) , la focale F_{ML} nécessaire est supérieure au mètre !

Les solutions consistent soit à augmenter l'écart angulaire entre les positions de déflexion ce qui dans certain cas peut-être difficile (par exemple , cela conduit à des technologies de micro-miroirs plus complexes) soit à introduire des Moyens Optiques de Divergence MOD permettant d'augmenter la divergence des faisceaux en sortie $FD_{ls,Js,le,Je}^E$ en sortie des éléments $ED_{le,Je}^{NE}$ du moyen de déflexion MD^{NE} puis de diminuer de la même valeur la divergence des faisceaux $FDF_{ls,Js,le,Je}^S$ focalisés sur les éléments $E_{ls,Js}^{1S}$ du moyen de déflexion MD^{1S} .

Cette configuration est présentée sur les figures 6d ($\varphi = 0$) et 6e ($\varphi = 45^\circ$) déduites des figures 6a et 6c mais avec introduction des Moyens Optiques de Divergence 56 et 57 .

Ces moyens optiques de divergence MOD peuvent être des matrices d'éléments optiques réfractifs (micro- lentilles de courtes focales f_{MOD} divergentes comme représenté sur la figure 6d ou convergentes) ou éventuellement réflectifs (micro-miroirs de courtes focales) . Ils réalisent la conjugaison optique des différents éléments $ED_{le,Je}^{NE}$ avec un grossissement G_{MOD} très inférieure à 1 et donc un grandissement angulaire $1/ G_{MOD}$ très supérieure à 1 . Les valeurs angulaires $\theta_{ls,js,le,je}^E$ deviennent $\theta_{ls,js,le,je}'^E$ et les valeurs angulaires $\theta_{ls,js,le,je}^S$ deviennent $\theta_{ls,js,le,je}'^S$ (voir figure 6d pour les détails et la figure 6e sur laquelle seules les différences amplifiées des valeurs angulaires $\theta_{ls,js,le,je}'^E$ et $\theta_{ls,js,le,je}'^S$ sont reproduites) .

Il est alors facile de voir que dans ce type de configuration la focale F_{ML} est divisée par une valeur de l'ordre de G_{MOD} .

Si G_{MOD} est par exemple choisie égale à 10 , F_{ML} ne sera plus , avec les mêmes paramètres que précédemment , que de l'ordre de la dizaine de centimètres .

Le problème des aberrations optiques reste cependant posé par l'inclinaison du moyen optique de focalisation MOF particulièrement dans le cas d'angles φ élevés (par exemple 45° comme dans les illustrations des figures 6c et 6e) .

Il est possible de surmonter le problème grâce à la configuration de la figure 6f dans laquelle sont insérés des Moyens Optiques de Basculement Angulaire MOBA 58 qui réalisent l'image des différents éléments $ED_{le,Je}^{NE}$ dans un plan PFO 53 perpendiculaire à l'axe optique du système avec un **grossissement G_{MOBA} constant** .

Cette configuration peut par exemple s'obtenir avec des modules MOBA composés d'éléments de conjugaison optique (en général micro-lentilles convergentes ou divergentes ou micro-miroirs en configuration similaire à celle des éléments des autres sous-systèmes) qui possèdent chacun une **focale $f_{MOBA le,Je}$** , adaptée à la réalisation de la configuration souhaitée et dont la valeur est telle que :

$$f_{MOBA le,Je} = D_{le,Je} \cdot (G_{MOBA} / (G_{MOBA} + 1)^2)$$

ou $D_{le,Je}$ est la distance entre l'élément $ED_{le,Je}^{NE}$ du moyen de déflexion MD^{NE} et le plan PFO 53 confondu avec le plan focal objet 51 du moyen optique de focalisation MOF.

Les distances $D'_{le,Je}$ et $D''_{le,Je}$ séparant chaque élément de conjugaison du module MOBA 58 respectivement de l'élément de déflexion correspondant $ED_{le,Je}^{NE}$ et du plan PFO sont égales à :

$$D'_{le,Je} = D_{le,Je} \cdot G_{MOBA} / (G_{MOBA} + 1)$$

$$D''_{le,Je} = D_{le,Je} \cdot 1 / (G_{MOBA} + 1)$$

Sur la figure 6f, les différents éléments 58 du module MOBA sont des micro-lentilles convergentes.

Un module MOBA similaire (composé des éléments 59 similaires aux éléments 58) mais retourné par rapport à l'axe optique du système sera aussi introduit pour réaliser la conjugaison du plan PFI 54, confondu avec le plan focal image 52 du moyen optique de focalisation MOF, avec les différents éléments $E_{ls,Js}^{1S}$ du moyen de déflexion MD^{1S} comme le montre la figure 6f.

Il est bien sûr clair qu'en choisissant le grossissement G_{MOBA} très inférieur à 1 les problèmes d'encombrement et d'aberrations optiques du module MOLI de liaison sont résolus simultanément puisque le moyen de focalisation travaille perpendiculairement à l'axe optique du système et que l'angle de divergence des faisceaux $FD_{ls,Js,le,Je}^E$ est multiplié par la valeur $1/G_{MOBA}$ très supérieure à 1

• sous-système de sortie de déflexion et de réorientation des faisceaux optiques:

Ce sous-système désigné par 35 sur la figure 2 est non représenté en détail car il est similaire au sous-système de déflexion d'entrée dont la figure 4 donne un exemple de représentation. Il utilise un module de sortie $MAPA^S$ mettant en jeu comme pour le module $MAPA^E$ une cascade d'au moins N moyens de

déflexion MD^{1S} , MD^{2S} , ..., MD^{IS} , ..., MD^{NS} telle que deux moyens consécutifs MD^{I+1S} et MD^{IS} soient conjugués optiquement par le moyen de conjugaison optique MCO^{IS} avec le grossissement $G_{I+1,I}$.

Ce sous-système a pour objectif de redresser les rayons $FDF^{S}_{Is,Js,Ie,Je}$ incidents sur les éléments $ED^{1S}_{Is,Js}$ du moyen de déflexion MD^{1S} afin de les rendre à nouveau parallèles à l'axe optique du système.

Il doit donc pouvoir, grâce à la cascade de moyens de déflexion MD^{1S} , MD^{2S} , ..., MD^{NS} , ramener à la valeur nulle l'ensemble des valeurs de déflexion angulaires $\theta^{S}_{Is,Js,Ie,Je}$ que peuvent prendre les différents rayons focalisés $FDF^{S}_{Is,Js,Ie,Je}$. Ce redressement angulaire est symbolisé sur la figure 7 par l'épaisseur de plus en plus faible du trait des différentes familles de rayons 214, 213, 212.

Le module $MAPA^S$ met en jeu le même nombre N de moyens de déflexion MD^{IS} que le module $MAPA$ d'entrée $MAPA^E$ afin de posséder le même nombre $N'_S \cdot N''_S$ de positions de déflexion angulaires que celui-ci et pouvoir redresser tous les rayons potentiels $FDF^{S}_{Is,Js,Ie,Je}$ grâce à un adressage convenable de chacun des éléments des différents moyens de déflexion MD^{1S} , MD^{2S} , ..., MD^{NS} .

Chacun des moyens de déflexion MD^{1S} , MD^{2S} , ..., MD^{NS} , du module $MAPA^S$ possédera $N'_S \cdot N''_S$ éléments de déflexion $ED^{1S}_{Is,Js}$, $ED^{2S}_{Is,Js}$, ..., $ED^{NS}_{Is,Js}$. Le nombre $N'_S \cdot N''_S$ pourra être supérieur mais le plus souvent égal au nombre $N'_E \cdot N''_E$ des éléments de déflexion $ED^{1E}_{Ie,Je}$, $ED^{2E}_{Ie,Je}$, ..., $ED^{NE}_{Ie,Je}$ des moyens de déflexion de la cascade d'entrée MD^{1E} , MD^{2E} , ..., MD^{NE} .

(voir remarque dans ce même paragraphe).

En sortie des éléments de déflexion $ED^{NS}_{Is,Js}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NS} du module $MAPA^S$, il y a donc $N'_S \cdot N''_S$ faisceaux optiques de sortie redressés $FS_{Is,Js}$ qui peuvent provenir de l'un quelconque des $N'_E \cdot N''_E \cdot N'_S \cdot N''_S$ faisceaux optiques $FD^E_{Is,Js,Ie,Je}$ pouvant être potentiellement générés par le module $MAPA^E$ et focalisés par le module de liaison $MOLI$ suivant les $N'_E \cdot N''_E \cdot N'_S \cdot N''_S$ faisceaux $FDF^S_{Is,Js,Ie,Je}$.

- sous-système de sortie de mise en forme des faisceaux optiques

Ce sous-système désigné par 45 sur la figure 2 permet la mise en forme des $N's \cdot N''s$ faisceaux optiques de sortie $FS_{Is,Js}$ redressés angulairement par le module de sortie $MAPA^S$ et donc rendus tous à nouveau parallèles à l'axe optique du système. Il est similaire au sous-système de mise en forme des faisceaux optiques d'entrée 35 représenté en détail figures 4a et 4b.

Il sera désigné par l'abréviation $MIFO^S$ (pour module de Mise en FOrme de sortie).

Il comportera $N's \cdot N''s$ éléments optiques de focalisation $MF_{Is,Js}^S$ réfractifs (micro-lentilles) ou réflectifs (micro-miroirs) disposés dans la même configuration géométrique que les autres éléments du système de routage et focalisera chacun des $N's \cdot N''s$ faisceaux optiques $FS_{Is,Js}$, 212, redressés en sortie des éléments $ED_{Is,Js}^{NS}$ du dernier moyen de déflexion MD^{NS} du module de sortie $MAPA^S$ dans chacune des fibres optiques correspondantes de sortie $FO_{Is,Js}^S$.

La focale f_{MFS} des éléments optiques de mise en forme de sortie est calculée de façon à transformer chacun des faisceaux optiques $FD_{Is,Js,Ie,Je}^S$, restés gaussiens au cours des différentes conjugaisons réalisées, en un faisceau toujours gaussien mais dont le 'waist' ω_{FOS} se trouve à nouveau adapté à celui des fibres optiques de sortie $FO_{Is,Js}^S$.

Le plus souvent les fibres optiques de sortie $FO_{Is,Js}^S$ seront identiques aux fibres optiques d'entrée $FO_{Ie,Je}^E$ avec en particulier un mode gaussien de 'waist' ω_{FOS} identique au 'waist' ω_{FOE} des fibres optiques d'entrée. Comme le module de déflexion d'entrée $MAPA^E$ comporte le même nombre de conjugaisons optiques que le module de déflexion de sortie $MAPA^S$ mais avec un grossissement totale inverse $1/G_T$ ($G_T = \prod_{1 \rightarrow N-1} G_{I+1,I}$), le 'waist' ω_{FS} des $N's \cdot N''s$ faisceaux optiques $FS_{Is,Js}$ sera égal au 'waist' ω_{FIE} des faisceaux incidents $FI_{Ie,Je}^E$ et la focale f_{MFS} des éléments de mise en forme du module $MIFO^S$ sera en général identique à celle f_{MFE} des éléments de mise en forme du module $MIFO^E$ d'entrée.

La figure 7 donne un exemple de réalisation possible d'un routeur point à point utilisant des modules MAPA composés d'une cascade de 2 moyens de déflexion à 4 éléments chacun.

4.2 routeur diviseur de puissance

Il s'agit dans ce type de routeur de partager la puissance (et par conséquent l'ensemble des informations des différents canaux) transportée par les N_E fibres d'entrée et de réorienter chacune des différentes fractions ainsi créée vers une fibre de sortie . Le partage peut être réaliser en partageant la puissance transportée par chaque fibre d'entrée en K parties égales cas le plus courant) ou non .

Ce type de routeur est illustré schématiquement figure 3b . Il ne diffère du précédent que par l'addition en sortie de chaque fibre d'entrée d'un composant diviseur de puissance 60 qui partage la puissance lumineuse et donc l'ensemble des informations transportées par chaque fibre d'entrée en K parties le plus souvent égales . La figure 3b montre un tel dispositif dans le cas où le nombre N_E de fibres.. d'entrée est égal à 4 et le facteur K égal aussi à 4 générant ainsi 16 faisceaux distincts qui pourront être alors dirigés vers n'importe laquelle des fibres de sortie (au moins 16) par un routeur point à point identique au précédent

Plus généralement , il faudra au moins $K \cdot N_E$ fibres de sortie pour que toutes les faisceaux optiques d'entrée générés $FI_{ie,Je}$ (le variant de 1 à N_E et Je de 1 à K) puisse trouver une fibre d'accueil en sortie .

En toute rigueur le partage de puissance des fibres d'entrée peut ne pas se faire avec le même facteur K mais avec des facteurs K_{ie} différents pour chaque fibres d'entrée FO_{ie} ; dans ce cas , il faudra disposer d'au moins $\sum_{1 \rightarrow N_E} K_{ie}$ fibres de sortie . Dans la suite de la présentation et sans que cela nuise à la généralité de l'invention nous supposons que K est identique pour toutes les fibres d'entrée .

Notons aussi que dans ce type de diviseur , la division de puissance est réalisée quelle que soit la longueur d'onde véhiculée par la fibre comme schématisé sur la figure 3b par des traits multicolores symbolisant les différents faisceaux optiques générés .

Le diviseur de faisceaux peut être de différente nature et mettre en jeu soit les techniques de l'optique intégrée avec des diviseurs **130** constitués par l'association de guides de lumière et de jonctions Y sur une puce (diviseurs $1 \rightarrow 8$, $1 \rightarrow 16$, $1 \rightarrow 32$... commercialement disponibles) comme le montre figure 8 soit celles des fibres optiques (diviseurs disponibles avec de faibles facteurs de division K) ou encore celles de l'optique espace libre .

Dans les deux premiers cas les diviseurs de puissance seront en général connectés directement aux fibres optiques d'entrée et la configuration d'entrée sera identique à celle du routeur précédent en remplaçant simplement le nombre de faisceaux F_{I_e, J_e} à réorienter par $K \cdot N_E$ au lieu de N_E ; la mise en forme des faisceaux F_{I_e, J_e} se faisant après les diviseurs de façon identique .

Dans le cas d'un module diviseur **60** réalisé en optique espace libre la division de puissance lumineuse et la mise en forme des faisceaux peut être réalisée par le même module comme par exemple le module représenté figure 9 et qui comprend :

- une première barrette **61** de lentilles cylindriques ou sphéro-cylindriques permettant à la fois de collimater chacun des N_E faisceaux issus de la barrette des N_E fibres d'entrée **1** dans la direction de l'axe OX de cette barrette et favorablement d'augmenter leur ouverture angulaire $\Delta\beta$ suivant les plans perpendiculaires à OX afin de former N_E faisceaux optiques de forme dissymétrique **64** comme le montre la figure 9
- une seconde barrette **62** de lentilles cylindriques ou sphéro-cylindriques permettant de collimater les N_E faisceaux optiques dissymétriques obtenus .
- une matrice **63** de micro-lentilles ou de micro-miroirs sphériques permettant de former les $K \cdot N_E$ faisceaux optiques parallèles **112** d'entrée F_{I_e, J_e} (le variant de 1 à N_E , J_e de 1 à K) avec l'ouverture angulaire et la répartition spatiale souhaitées

Les focales des différents éléments du module diviseur ainsi formés seront choisies en fonction du nombre K , de l'espacement géométrique désirés pour les $K \cdot N_E$ faisceaux optiques d'entrée et de l'encombrement disponible .

Le dessin de la figure 9 met en jeu une barrette de fibres d'entrée **1** pour des raison de simplification de présentation . Il est clair qu'il est possible d'utiliser

des configurations de fibres optiques d'entrée en matrices à condition de prendre en compte dans le dimensionnement des éléments de cette matrice et la place que va occuper dans le système de routage les K faisceaux générés par le module diviseur. En tout état de cause, cette matrice sera toujours très dissymétrique avec des espacements moyens entre fibres environ K fois plus grand dans une direction que dans l'autre; dans le cas du module diviseur de la figure 9 on aura par exemple des espacements moyens suivant la direction OY environ K fois ceux représentés suivant la direction OX. Il est bien sûr possible d'imaginer une configuration dans lesquels les géométries de la matrice entre les directions OX et OY seraient échangées.

4.3 routeur démultiplexeur de longueurs d'ondes

Ce type de routeur se déduit du routeur précédent par simple remplacement du module diviseur de puissance par un module démultiplexeur de longueurs d'ondes 70 comme représenté sur la figure 3c.

Si chacune des N_E fibres optiques d'entrée transportent L longueurs d'ondes différentes $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_L$, le module démultiplexeur générera pour chacune des fibres d'entrée L faisceaux optiques et le problème sera donc ramener à celui du routeur point à point du paragraphe 4.1 avec un nombre de faisceaux $F_{Ie,Je}$ à gérer égal à $L \cdot N_E$ (le variant de 1 à L et Je de 1 à N_E).

Comme dans le cas du routeur diviseur de puissance, le module démultiplexeur peut être soit réalisé en optique intégrée 140 comme le montre la figure 10 avec des composants commercialisés de type AWG ('Array Waveguides Gratings') pouvant être directement connectés aux fibres d'entrée; le sous-système de mise en forme des $L \cdot N_E$ faisceaux optiques générés étant placé après le module démultiplexeur et similaire à celui décrit paragraphe 4.1, soit réaliser en optique espace libre comme le montre la figure 11 dans une configuration d'exemple.

Sur cette figure 11, le démultiplexage des longueurs d'ondes est obtenu par un réseau de diffraction 72 dont les traits sont parallèles à l'axe OX de la barrette de fibres d'entrée. Après mise en forme adaptée en terme d'ouverture angulaire

par une barrette de micro-lentilles de collimation 71 (en général sphériques), chaque longueur d'onde $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_L$, transportée par chacune des fibres d'entrée est diffractée suivant un angle $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_L$.

En sortie du réseaux de diffraction dont le pas est adapté à l'écart $\Delta\lambda$ (en général constant entre les différentes longueurs d'ondes à séparer) il y a donc N_E familles de L faisceaux optiques 73 séparés angulairement et de longueurs d'ondes différentes. Ces faisceaux doivent être réorientés suivant la même direction (direction de l'axe optique du routeur) grâce par exemple à la barrette de miroirs paraboliques 74.

En sortie du module démultiplexeur, il y a donc génération comme souhaité de $L \cdot N_E$ faisceaux parallèles 2 pouvant être indicés $Fl_{le,Je}$ (le variant de 1 à L et Je de 1 à N_E).

Une matrice de $L \cdot N_E$ éléments de conjugaison (non représentée sur la figure 9) peut éventuellement être insérée entre la barrette de miroirs 74 et le sous-système de déflexion d'entrée pour adapter l'ouverture angulaire des faisceaux optiques aux paramètres du routeur.

Notons que dans la matrice de faisceaux incidents ainsi formée, chaque faisceau appartenant à une même ligne d'indice le possède la même longueur d'onde qui pourra donc être indicé par λ_{le} (le variant de 1 à L et λ_{le} prenant donc les valeurs $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_L$).

Comme au paragraphe précédent les fibres d'entrée disposées en barrettes sur la figure 11 par raisons de simplification peuvent être configurées en matrices avec les mêmes contraintes déjà signalées. De même qu'il est bien sûr toujours possible d'échanger dans l'invention le rôle des lignes et des colonnes dans les matrices considérées.

4.4 routeur démultiplexeur-multiplexeur de longueurs d'ondes.

Ce type de routeur correspond à la représentation schématique planaire de la figure 3d et matricielle de la figure 12.

En entrée, il possède une configuration identique au routeur démultiplexeur mais chacun des N_E canaux d'information de même longueur d'onde λ_{le}

transporté par une fibre d'entrée quelconque FO_{Je} de la barrette de fibres d'entrée 1 est mélangé et réorienté par le routeur puis remultiplexé vers une fibre de sortie 5 quelconque. A la différence du routeur démultiplexeur précédent chaque fibre de sortie reçoit non pas un seul canal d'information mais L canaux issus de n'importe quelle fibre d'entrée, chacun attaché à une longueur d'onde λ_{le} distincte.

Le routeur précédent nécessitait au moins $L \cdot N_E$ fibres de sortie alors que le routeur démultiplexeur-multiplexeur ne nécessite plus qu'au moins $N_S = N_E$ fibres de sortie.

Le fonctionnement de ce routeur sera mieux compris sur le schéma de la figure 1d dans lequel chacun des canaux d'information injecté dans les différentes fibres de sortie est distingué par sa longueur d'onde λ_{le} d'entrée (couleur des différents rayons lumineux) et par sa fibre d'entrée d'origine (ronds de couleurs différentes). Pour obtenir cette fonctionnalité il convient d'utiliser la succession des sous-systèmes suivants:

- un module démultiplexeur 70 tel que décrit précédemment et générant, pour une barrette de N_E fibres d'entrée transportant chacune L longueurs d'ondes, une matrice de $L \cdot N_E$ faisceaux optiques parallèles à l'axe optique du système $Fl_{le,Je}$ (voir la figure 12). Dans cette matrice, l'indice colonne Je représente le numéro de la fibre d'entrée génératrice du faisceau (Je varie de 1 à N_E) et l'indice ligne le représente la longueur d'onde λ_{le} transportée (le varie de 1 à L)
- un routeur point à point permettant d'échanger de manière quelconque l'ensemble des faisceaux $Fl_{le,Je}$ d'une **même ligne 'le'** de la matrice ainsi formée, c'est à dire d'échanger l'ensemble des N_E faisceaux de même longueur d'onde λ_{le} de cette ligne. Cette opération peut être réalisée à partir d'un routeur point à point utilisant des sous systèmes de déflexion d'entrée et de sortie mettant chacun en jeu un module MAPA (décrit dans l'invention précédente) à **déflexion linéaire** (c'est à dire dont les faisceaux sont défléchis suivant un plan parallèle à la direction définie par les lignes de la matrice des

faisceaux optiques incidents $FI_{ie,Je}$ et l'axe optique du système) et un module de liaison MOLI similaire à celui décrit en détail au paragraphe 4.1 .

Le routeur point à point proposé permet donc le brassage de tous les faisceaux optiques de même longueur d'onde mais ne doit pas permettre d'échange entre les lignes comme le montre la figure 12 de façon à ce qu'un multiplexeur **80** similaire au démultiplexeur d'entrée puisse rassembler chacun des L canaux d'une colonne quelconque J_s de la matrice des faisceaux optiques de sortie (chaque canal transportant ses informations sur une porteuse lumineuse de longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_L$) dans la fibre de sortie correspondante FO_{J_s} .

- un module multiplexeur de sortie **80** similaire au module démultiplexeur d'entrée **70** et qui permet donc de rassembler chacun des L faisceaux optiques d'une colonne d'indice J_s vers la fibre de sortie correspondante FI_{J_s} .

4.5 routeur démultiplexeur-multiplexeur généralisé

Le routeur démultiplexeur-multiplexeur précédent peut être généralisé afin de permettre la réalisation de toutes les configurations de routage entre le cas illustré sur la figure 3c où chaque canal de longueur d'onde λ_{ie} et provenant de la fibre d'entrée FO_{Je} est orienté vers une fibre de sortie distincte (routeur démultiplexeur) et le cas illustré sur les figures 3d et 12 où chacune des fibres de sortie reçoit L canaux de longueur d'onde distincte .

Le nombre minimum de fibres de sortie N_{Smin} requis pour le bon fonctionnement du routeur pour lequel à chaque canal d'entrée correspond au moins une fibre de sortie est $N_{Smin} =$

$L \cdot N_E$ dans la configuration de la figure 1c (routeur démultiplexeur) et $N_{Smin} = N_E$ dans celle de la figure 3d et 12 (routeur démultiplexeur-multiplexeur) .

Il peut dans certaines configurations de réseaux de communication être intéressant de pouvoir avoir accès à des configurations intermédiaires où par exemple seulement L' des L longueurs d'ondes transportées par chacune des fibres d'entrée puissent être prélevées et orientées vers des fibres de sortie distinctes , les $L - L'$ longueurs d'ondes restantes étant orientées pour chacune des fibres d'entrée vers une seule fibre de sortie . Dans cette situation le

nombre minimum de fibres de sortie nécessaire sera $N_{Smin} = (L'+1) \cdot N_E$: si $L'=1$ (une longueur d'onde prélevée par fibre d'entrée) il faudra au moins $2 \cdot N_E$ fibres de sortie .

Toutes ces configurations que l'on peut désignées sous le nom de 'Add and Drop généralisé

sont réalisables à partir du routeur démultiplexeur-multiplexeur du paragraphe 4.4 .

Il suffit pour cela d'utiliser un sous-système de routage point à point identique à celui décrit au paragraphe 4.4 mais permettant le routage des N_E faisceaux d'entrée composant chacune des lignes non plus vers au moins $N_S = N_E$ faisceaux de sortie par lignes mais vers au moins $N_S = (L'+1) \cdot N_E$: L' pouvant varier de 0 (cas du routeur démultiplexeur-multiplexeur sans redondance possible des figures 3d et 12 où $N_S = N_E$) à $L-1$ (cas du routeur démultiplexeur sans redondance possible de la figure 3c où $N_S = L \cdot N_E$) . Cela implique dans le cas le plus complexe que la cascade de moyens de déflexion des deux modules MAPA à déflexion linéaire mis en jeu dans le routeur point à point devra permettre de générer au moins $L \cdot N_E$ positions de déflexion angulaires .

4.6 Contrôle de fonctionnement des différents routeurs

Comme dans l' invention décrite dans la demande de brevet du même jour concernant les modules MAPA , il est en général indispensable de pouvoir s'assurer en permanence du bon fonctionnement du système de routage et en particulier que les éléments actifs mis en jeu occupent bien les différentes positions programmées .

Ce contrôle peut être réalisé de façon similaire à celui décrit pour les modules MAPA par prélèvement à chaque étages des deux modules MAPA d'une partie de l'information représentative de l'état de configuration des positions de déflexion angulaire effectivement pris par rapport à l'état programmé . Ce prélèvement (voir figures 13a et 13b) peut se faire directement sur les faisceaux de signal 162 via des lames séparatrices adaptées 160 au prix de pertes globales plus élevées ou plus favorablement sur des faisceaux annexes

163 superposés aux faisceaux de signal via des lames séparatrices dichroïques 161.

Le module de contrôle 90 pourra être comme dans la demande de brevet du même jour constitué des éléments suivants (figures 13a et 13b) :

- un module optique de projection **MOP** , 164 , constitué par exemple d'une barrette ou d'une matrice de micro-lentilles ou de micro-miroirs adaptés permettant de transformer , pour chaque élément de déflexion à contrôler , les positions de déflexion angulaires générées en positions spatiales de façon biunivoque .
- Un détecteur de positions 165 favorablement placé au niveau ou au voisinage du plan focal des différents éléments du module MOP et dont l'ensemble des points de détection sont dans une configuration géométrique homothétique de la figure des positions de déflexion angulaire à contrôler . Ce détecteur de position pourra être par exemple une barrette ou une matrice de photodétecteur de type CMOS .
- Eventuellement un système optique de réduction d'image 166 éventuellement placé avant le module optique MOP pour adapter les dimensions des moyens de déflexion du module MAPA à celles du détecteur de position .

Bien entendu les éléments de contrôle pourront être placés à chaque étage des deux modules MAPA pour avoir un contrôle de tous les éléments de déflexion mis en jeu dans le routeur ou par exemple seulement en sortie de ces modules et n'avoir qu'un contrôle global de l'état du système. Ces moyens de contrôles décrits en détail dans la demande de brevet du même jour sont illustrés schématiquement sur les figures 13 .

Les figures 14 donnent à titre des exemples de configurations possibles des routeurs de l'invention pour différentes complexités de modules MAPA .

La Fig.14a illustre un routeur mettant en jeu des modules MAPA avec une cascade de 2 moyens de déflexion . Sur cette figure , on a représenté schématiquement les éléments clé d'un routeur avec les fibres d'entrée 1 et de sortie 5, les sous-systèmes de mise en forme d'entrée et de sortie 40 et 45

composés chacun d'un module MAPA à 2 moyens de déflexion 10 et 11 et 15 et 16 dont chaque élément correspondant est conjugué optiquement par les moyens de conjugaison 20 et 25 , les sous-systèmes de déflexion d'entrée et de sortie 30 et 35 et le module de liaison 50 .

Les autres figures 14b , 14c , 14d mettent en jeu respectivement des modules MAPA à 3 , 4 et 5 moyens de déflexion (désignés par 10 ,11 , 12 , 13 ,14...en entrée et 15 ,16 ,17, 18, 19 ...en sortie) et dont les éléments correspondants de 2 moyens de déflexion consécutifs sont conjugués optiquement par les moyens de conjugaison 20, 21 , 22 , 23...en entrée et 25 , 26 , 27 , 28... en sortie.

Dans l'hypothèse de moyens de déflexion composés d'éléments miroirs 2 axes - 2 positions (voir demande de brevet du même jour) les différentes configurations des figures 14a , 14b , 14c , 14d permettent la réalisation de routeurs point à point de complexité croissante respectivement 16 entrées-16sorties , 64 entrées-64 sorties , 256 entrées-256 sorties , 1024 entrées-1024 sorties.

4.7: Module de liaison : variante

Dans les configurations décrites jusqu' à présent, chaque élément des matrices de déflexion mis en jeu dans les différents modules correspond à une fibre d'entrée et les modules d'entrée et de sortie sont distincts.

Il peut être intéressant d'utiliser les mêmes matrices d'éléments de déflexion (et par conséquent aussi les même matrices de micro-lentilles de mise en forme des faisceaux ou de conjugaison) pour obtenir un système plus compact et/ou pour simplifier le packaging (moitié moins d'éléments à aligner). Cette variante est représentée figure 15. Dans ce cas, bien sûr, la moitié des éléments de chaque matrice mise en jeu est réservée aux faisceaux optiques d'entrée 2 et forme les sous-systèmes 40 et 30 , l'autre moitié est réservée aux faisceaux de sortie 6 et forme les sous-systèmes 45 et 35 (voir figure 16). Cette opération peut être effectuée grâce au montage optique montré figure 15 dans lequel à été incorporé dans le module de liaison MOLI 50 un miroir de renvoi

300 dont le plan focal image F_{IM} est confondu avec le plan focal image F_{IL} 52 de la lentille de focalisation 55 : le reste de la configuration du module de liaison restant identique.

Sur la figure 15, on a schématisé, pour une meilleure compréhension, le mode de fonctionnement d'un routeur de ce type réalisé à partir de barrettes de 8 éléments : les 4 éléments supérieurs voyant les faisceaux d'entrée et les 4 éléments inférieurs les faisceaux de sortie.

Bien entendu le montage se généralise au cas de matrices de dimensions quelconques, les éléments correspondant aux faisceaux de sortie étant symétriques, par rapport au centre de la matrice, des éléments correspondants aux faisceaux d'entrée.

Suivant l'ouverture angulaire totale occupée par l'ensemble des faisceaux mis en jeu, le miroir de renvoi peut être sphérique ou parabolique.

La configuration de la figure 15 est une configuration en ligne pour simplification mais le montage proposé s'applique de la même façon aux configurations pour lesquelles l'angle d'inclinaison ϕ n'est pas nul, avec des variantes similaires à celles décrites dans la partie 4.1 consacrée au module de liaison.

4.8. optimisation du système de routage : position favorable des 'waist' des faisceaux lumineux gaussiens

Comme il a été souligné au début de la partie 4, les faisceaux lumineux issus des différentes fibres optiques peuvent être assimilés à des faisceaux gaussiens dont la forme gaussienne se conserve au cours des différentes conjugaisons optiques.

En sortie de la fibre optique, le faisceau possède un rayon minimum ω_{FOE} appelé couramment 'waist' ; il diverge ensuite de façon hyperbolique dont les 2 asymptotes sont séparées angulairement d'un angle $\Delta\phi_{FOE}$ dont la valeur est (voir figure 3) :

$$\Delta\phi_{FOE} = 2\lambda / \pi \cdot \omega_{FOE}$$

$\Delta\phi_{FOE}$ est l'ouverture angulaire (ou divergence) du faisceau gaussien issu de la fibre optique. Après collimation par les micro-lentilles du sous-système de mise en forme 40, ces faisceaux restent gaussiens avec un 'waist' de dimension ω_{FIE} et une ouverture angulaire :

$$\Delta\phi_{FIE} = 2\lambda / \pi \cdot \omega_{FIE}$$

Dans un système d'imagerie optique mettant en jeu des faisceaux gaussiens, la position des 'waist' obéit à des règles de conjugaison voisines de celles qui régissent l'optique géométrique, excepté au voisinage des foyers de l'optique d'imagerie. Sans rentrer dans les détails des équations qui permettent de calculer la position des 'waist' objet et image donnés par une lentille, il faut retenir que la principale différence est que, si la position du 'waist' du faisceau gaussien se situe au foyer objet de la lentille, la position du waist image sera non pas à l'infini comme le voudrait une conjugaison objet -image classique, mais au foyer image de cette lentille.

Dans le cas du dispositif de l'invention, il peut être intéressant que la position des 'waist' des différents faisceaux lumineux mis en jeu soit située dans le plan des éléments des différents moyens de déflexion pour deux raisons :

- le 'waist' correspondant à la dimension minimale d'un faisceau gaussien, c'est dans cette situation que les miroirs du dispositif auront les dimensions minimum (encombrement plus réduit et plus grande facilité de réalisation des miroirs en micro-technologies),
- au niveau du 'waist' la surface équiphase du faisceau gaussien est plane (sphérique ailleurs) ce qui minimise les aberrations optiques lors des réflexions miroir.

Dans la réalisation du routeur, on cherchera donc à se placer dans cette situation illustrée pour le module d'entrée de mise en forme 40, figures 4a ou 4b, dans laquelle le 'waist' ω_{FOE} de la fibre optique a son image ω_{FIE} dans le plan des différents éléments du premier moyen de déflexion MD^{1E}.

En général cette configuration favorable sera toujours réalisable. Cependant, les 'waist' image donnés par les micro-lentilles de collimation du module de mise en forme sont le plus souvent peu distants de celles-ci du fait de la faible longueur focale f_{MFE} de ces lentilles, conduisant à des difficultés de positionnement du premier moyen de déflexion. Il est alors favorable de rajouter après la matrice de lentilles de mise en forme 41 une matrice de lentilles de transport 311 de plus grande focale qui permet de surmonter ce problème en formant une nouvelle image, plus lointaine, du 'waist' ω_{FIE} . Cette variante est représentée figure 17 en configuration en ligne.

Bien sûr la même configuration sera utilisée pour le module de mise en forme de sortie.

On appréciera que les exemples de réalisation qui viennent d'être décrits, à titre préféré, proposent :

- un dispositif de routage optique point à point permettant d'orienter de manière bi-univoque les informations transportées par une fibre optique quelconque parmi N_E fibres d'un réseau de fibres optiques d'entrée 1 vers une fibre optique quelconque parmi N_S fibres d'un réseau de fibres optiques de sortie 5 caractérisé par la mise en jeu des éléments suivants :

- Un sous-système ou module de mise en forme d'entrée 40 composés de moyens optiques d'entrée permettant la mise en forme de chacun des N_E faisceaux lumineux issus de chacune des N_E fibres optiques d'entrée et de générer N_E faisceaux optiques parallèles 112 et d'ouverture angulaire adaptée,
- Un sous-système ou module de déflexion d'entrée 30 permettant la multiplication du nombre de positions de déflexion angulaire des faisceaux lumineux d'entrée et composé d'un ensemble de N moyens de déflexion MD^{1E} , MD^{2E} ... MD^{IE} ... MD^{NE} , mis en cascade comprenant chacun au moins N_E éléments de déflexion disposés suivant une configuration identique à celle des N_E faisceaux optiques d'entrée et permettant de générer pour chacun de ces faisceaux optiques d'entrée un nombre P_{TN} de positions de déflexion angulaire distinctes, au moins égal au nombre N_S de fibres du réseau de fibres optiques de sortie,

- Un module de liaison 50 permettant de rassembler en un même point de l'espace toutes les positions de déflexion potentielles parallèles entre elles que peuvent prendre en sortie de chacun des éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} du sous- système de déflexion d'entrée les N_E faisceaux lumineux parallèles formés par le sous-système de mise en forme d'entrée .

Le module de liaison fournit donc un nombre P_{TN} de points de focalisation spatiale potentielle égal au nombre P_{TN} de positions de déflexion angulaire potentiellement fournies par chacun des N_E éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} et assure une correspondance bi-univoque entre ces P_{TN} positions de déflexion angulaire et ces P_{TN} points de focalisation spatiale.

- Un sous- système de déflexion de sortie 35 permettant la réorientation des P_{TN} faisceaux lumineux potentiellement générés en sortie du module de liaison 50 ,et composé d'un ensemble de N' (au moins égal à N) moyens de déflexion MD^{1S} , MD^{2S} ... MD^{IS} ... MD^{NS} mis en en cascade comprenant chacun P_{TN} (au moins égal à N_S) éléments de déflexion et permettant la réorientation angulaire de chacun des P_{TN} faisceaux lumineux incidents sur chacun des P_{TN} éléments du premier moyen de déflexion MD^{1S} afin de les rendre parallèles à une même direction commune.

- Un sous-système ou module de mise en forme de sortie 45 composé de moyens optiques de sortie permettant la mise en forme de chacun des P_{TN} faisceaux lumineux parallèles potentiellement générés en sortie du dernier moyen de déflexion MD^{NS} du sous-système de démultiplication et permettant d'adapter les caractéristiques optiques de ces P_{TN} faisceaux parallèles aux caractéristiques optiques des fibres optiques de sortie afin de pouvoir injecter N_S (parmi P_{TN}) de ces faisceaux dans les N_S fibres optiques avec le moins de pertes possibles.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel les sous-systèmes de déflexions d'entrée de sortie sont des modules de multiplication de positions de déflexion angulaire décrits dans la demande de brevet déposée le même jour. Ces modules utilisent une cascade de moyens de déflexion MD^1 , MD^2 , ..., MD^I , ..., MD^N dont deux moyens consécutifs MD^I et MD^{I+1} sont conjugués

optiquement par des moyens de conjugaison optique MCO^I avec un grossissement :

$$G_{I,I+1} = P_I \cdot (P_{I+1} - 1) / (P_I - 1)$$

où P_I et P_{I+1} représentent le nombre de positions angulaires pouvant être prises par les éléments de déflexion des moyens de déflexion MD^{IE} et MD^{I+1E}.

Lorsque $P_I = P_{I+1} = P$, $G_{I,I+1} = P$.

- un dispositif de routage du type précité dans lequel le module de liaison 50 est constitué d'un moyen de focalisation 55 réfractif (lentille) ou réflectif (miroir) permettant de focaliser l'ensemble des $P_{TN} \cdot N_E$ faisceaux lumineux potentiellement défléchis par les N_E éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} du sous-système de déflexion d'entrée 30 dans son plan focal image 52 et de réaliser ainsi une correspondance bi-univoque entre les P_{TN} positions de déflexion angulaire distinctes parallèles (c'est à dire qui correspondent aux mêmes angles de déflexion par rapport à un repère du système commun) générés par les éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} et les P_{TN} foyers images vers lesquels vont converger les P_{TN} faisceaux potentiellement défléchis correspondants.

- un dispositif de routage du type précité dans lequel les N_E éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} du sous-système de déflexion d'entrée 30 sont situés dans le plan focal objet 51 du moyen de focalisation du module de liaison 50.

- un dispositif de routage du type précité suivant lequel le module de liaison 50 met en jeu des moyens optiques d'augmentation 56 et de diminution 57 des écarts angulaires entre les P_{TN} positions de déflexion des faisceaux lumineux potentiels respectivement générées par chacun des éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} et focalisées sur chacun des éléments du premier moyen de déflexion MD^{1S}; ces moyens optiques 56 et 57 permettant de diminuer les dimensions du module de liaison.

Dans cette configuration, les plans focaux objet 51 et image 52 du moyen de focalisation du module de liaison coïncident respectivement avec les plans images donnés par les moyens optiques d'augmentation 56 et de diminution 57 des écarts angulaires des éléments de déflexion des moyens de déflexion respectivement MD^{NE} et MD^{IS} .

- un dispositif de routage du type précité dans lequel le module de liaison 50 comporte un miroir de renvoi 300 dont le plan focal image F_{IM} est confondu avec le plan focal image 52 de la lentille de focalisation 50. Ce miroir de renvoi permet un repliement du système de routage et rend possible l'utilisation des mêmes matrices d'éléments pour les différents sous-système d'entrée et de sortie : une moitié des éléments des différentes matrices est mise en jeu pour les sous-systèmes d'entrée, l'autre moitié, symétrique par rapport au centre des différentes matrices, étant mise en jeu pour les sous-systèmes de sortie.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel les fibres d'entrées 1 et les différents sous systèmes d'entrée (moyens optiques de mise en forme d'entrée 40, moyens de déflexion et de conjugaison du sous-système de déflexion d'entrée 30, et éventuellement moyens optiques éventuels d'augmentation 56 des écarts angulaires des positions de déflexion du module de liaison 50) sont disposés en barrettes linéaires de N_E éléments ou en matrices de $N'_E \cdot N''_E = N^E$ éléments.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel les différents sous systèmes de sortie (moyens optiques éventuels de diminution 57 des écarts angulaires des positions de déflexion du module de liaison 50, moyens de déflexion et de conjugaison du sous-système de déflexion de sortie 55 et moyens optiques de mise en forme 45 de sortie) et les fibres optiques de sortie 5 sont disposées en barrettes linéaires de N_S éléments ou en matrices de $N'_S \cdot N''_S = N_S$ éléments ; les P_{TN} positions de déflexion angulaire distinctes générées par chacun des éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} sont alors respectivement configurées en barrettes d'au moins N_S positions ou en matrices d'au moins N'_S lignes et N''_S colonnes.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel les différents moyens optiques de collimation ou d'imagerie associés aux différents

sous-système du routeur sont des barrettes ou des matrices composées d'éléments de type micro-lentilles ou micro-miroirs pouvant être réalisés par les procédés de fabrication collective mises en jeu dans les micro-technologies.

- un dispositif de routage du type précité dans lequel les moyens de déflexion des sous- systèmes de déflexion d'entrée 30 et de sortie 35 sont composés de barrettes ou de matrices d'éléments miroirs adressables électriquement et sont situés dans des plans parallèles d'angle d'inclinaison moyenne φ par rapport à l'axe optique général du système. Dans cette configuration 'repliée' le moyen de focalisation 55 du module de liaison 50 et les différents moyens optiques de collimation ou d'imagerie associés aux différents sous-système du routeur sont également situés dans de mêmes plans parallèles inclinés de l'angle φ de façon à garder une parfaite symétrie entre les différentes familles de faisceaux défléchis.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel les moyens de déflexion des sous- systèmes de déflexion d'entrée 30 et de sortie 35 sont des barrettes ou des matrices d'éléments adressables électriquement, de type micro-miroirs pouvant être réalisés par les procédés de fabrication collective mises en jeu dans les micro-technologies.

- un dispositif de routage optique du type précité dans lequel chacun des éléments des différents moyens optiques réfractifs de collimation ou de conjugaison mis en jeu dans les configurations 'repliées' d'angle d'inclinaison φ est positionné angulairement de façon que son axe optique reste parallèle à l'axe optique général (parallèle à la direction de déflexion moyenne de l'ensemble des faisceaux défléchis) du système de façon à minimiser les aberrations géométriques affectant les différents faisceaux optiques mis en jeu tout en préservant la symétrie du système.

- un dispositif de routage optique en configuration repliée du type précité dans lequel le module de liaison 50 mis en jeu dans les configuration 'repliées' d'angle d'inclinaison φ utilise des moyens optiques de basculement angulaire 58 et 59 permettant de rassembler les différents faisceaux potentiellement défléchis en sortie de chacun des éléments du dernier moyen de déflexion MD^{NE} dans un plan perpendiculaire à l'axe optique général du système puis

d'opérer l'opération inverse sur les différents faisceaux de façon à les refocalisés sur chacun des éléments du premier moyen de déflexion MD^{1S}.

Ces moyens de basculement angulaire permettent d'utiliser un moyen de focalisation 55 du module de liaison de type réfractif et de pouvoir le faire travailler dans une configuration perpendiculaire à l'axe optique général du système qui permet de minimiser les aberrations optiques induites par l'inclinaison ϕ . Ces moyens de basculement 58 et 59 peuvent par exemple être constitués de barrettes ou de matrices de micro-lentilles ou de micro miroirs dont la focale des différents éléments est calculée pour que chacune des conjugaisons optiques mises en jeu présente le même grossissement.

- un dispositif de routage optique en configuration repliée du type précité dans lequel les moyens de basculement angulaire 58 et 59 jouent en même temps le rôle des moyens d'augmentation 56 et de diminution 57 des écarts angulaires entre les faisceaux défléchis potentiels mis en jeu.

- un dispositif dit routeur diviseur de puissance caractérisé par l'introduction à l'entrée du routeur point à point 150 du type précité d'un composant 60 permettant de partager par exemple en K parties égales ou inégales la puissance lumineuse (et donc l'ensemble des informations transportées par chacune des fibres optiques) de chacune des fibres d'une barrette linéaire de N_E fibres d'entrée et de disposer d'une matrice de $K \cdot N_E$ faisceaux lumineux 112, chacun pouvant être orienté par le routeur point à point 150 vers l'une quelconque des fibres de sortie disposé en barrettes ou en matrices et dont le nombre N_S est au moins égal à $K \cdot N_E$.

- un dispositif dit routeur diviseur de puissance du type précité caractérisé par l'utilisation de composants diviseurs de puissance 60 réalisés en optique intégrée ; chacun des composants diviseurs de puissance 130 est connecté avec une fibre d'entrée et permet à partir de la barrette de N_E fibres d'entrée de générer une matrice de faisceaux lumineux 112 de K lignes et N_E colonnes pouvant être mise en forme par le sous-système de mise en forme d'entrée 40 du routeur point à point 150.

- un dispositif dit routeur diviseur de puissance du type précité caractérisé par l'utilisation de composants diviseurs de puissance réalisés en optique espace libre et comprenant :

- une première barrette 61 de N_E moyens de collimation (micro-lentilles ou micro-miroirs) qui permet de collimater les N_E faisceaux lumineux issus de chacune des fibres optiques d'entrée 1 dans la direction de l'axe de la barrette et de laisser inchangée ou d'augmenter leur ouverture angulaire dans la direction orthogonale. Cette première barrette 61 constituée par exemple de micro-lentilles cylindriques fournit N_E lignes de lumière très dissymétriques 64 et orientées suivant des axes perpendiculaires au plan défini par l'axe de la barrette de fibres et l'axe optique des faisceaux lumineux.

- une seconde barrette 62 de N_E moyens de collimation réfléchissants ou réfractifs permettant de collimater les N_E lignes de lumière formées. Ces moyens de collimation pouvant par exemple être des lentilles cylindriques dont l'axe de convergence est perpendiculaire à l'axe de convergence des moyens de collimation de la première barrette 61 et dont la focale est calculée pour obtenir des lignes de lumière de géométrie adaptée.

- une matrice 63 de $K \cdot N_E$ moyens optiques réfractifs ou réfléchissants de mise en forme permettant de générer à partir des N_E lignes de lumière $K \cdot N_E$ faisceaux lumineux 112 de caractéristiques optiques adaptées au routeur point à point 150.

- un dispositif dit routeur-démultiplexeur de variables optiques caractérisé par l'introduction à l'entrée du routeur point à point décrit précédemment d'un composant 70 permettant de séparer les différentes variables optiques $v_1, v_2 \dots v_L$, pouvant être utilisées comme support des informations transportées (longueurs d'ondes lumineuses, longueurs temporelles des impulsions lumineuses, états de polarisation de la lumière...). Si le composant démultiplexeur 70 de variables optiques considéré permet la séparation spatiale de L variables, sa connexion avec chacune des fibres optiques d'une barrette de N_E fibres optiques d'entrée 1 permettra de générer $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux 112 (correspondant à $L \cdot N_E$ canaux d'information)

pouvant être orientés par le routeur point à point 150 vers l'une quelconque des fibres de sortie disposées en barrettes ou en matrices et dont le nombre N_S est au moins égal à $L \cdot N_E$.

- un dispositif dit routeur démultiplexeur de variables optiques du type précité caractérisé par l'utilisation de composants démultiplexeur 70 de variables optiques réalisés en optique intégrée; chacun des composants démultiplexeur de variables optiques étant connecté avec une fibre d'entrée et permettant à partir de la barrette de N_E fibres d'entrée 1 de générer une matrice de faisceaux lumineux 112 de L lignes et N_E colonnes pouvant être mise en forme par le sous-système de mise en forme d'entrée du routeur point à point 150.

- un dispositif dit routeur démultiplexeur de variables optiques selon la revendication 17 et 18, pour lequel la variable optique considérée est la longueur d'onde lumineuse λ et pour lequel le composant démultiplexeur 70 utilisé est désigné en optique intégrée sous le terme AWG (Array Waveguides Gratings) ou 'Phasar' (pour Phase Array) 140.

- un dispositif dit routeur démultiplexeur de variables optiques du type précité, pour lequel la variable optique considérée est la longueur d'onde lumineuse λ caractérisé par l'utilisation de composants démultiplexeur 70 réalisés en optique espace libre et comprenant :

- une première barrette 71 de N_E moyens de collimation (micro-lentilles ou micro-miroirs) qui permet de collimater les N_E faisceaux lumineux issus de chacune des fibres optiques d'entrée 1 avec l'ouverture angulaire adaptée.

- une barrette 72 de réseaux de diffraction dont les traits sont orientés parallèlement à l'axe de la barrette de fibres d'entrée 1 et permettant de séparer spatialement les différentes longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ transportées par chacune des N_E fibres optiques d'entrée. La barrette de réseaux sera inclinée par rapport à des plans perpendiculaires à l'axe optique du système d'un angle dépendant de l'ouverture angulaire des faisceaux lumineux incidents et de l'écart des longueurs d'ondes des faisceaux adjacents diffractés par le réseau.

- une barrette 74 de moyens optiques permettant de réorienter suivant des directions parallèles chacun des L faisceaux lumineux de longueur d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ attachés à chacune des N_E fibres optiques d'entrée et générés par le réseaux de diffraction .

- une matrice de moyens optiques réfractifs ou réflectifs de mise en forme disposés en N_E colonnes et L lignes et permettant éventuellement d'adapter les caractéristiques optiques des $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux 112 obtenues au routeur point à point 150

- un dispositif dit routeur démultiplexeur- multiplexeur de variables optiques caractérisé par l'introduction à l'entrée et à la sortie du routeur point à point décrit précédemment d'un composant de démultiplexage 70 des variables optiques considérées (longueurs d'ondes ,longueurs des impulsions lumineuses, état de polarisation ...) à l'entrée et de multiplexage 80 des mêmes variables en sortie. Ce dispositif permet :

- grâce au démultiplexeur 70 de séparer spatialement les L variables optiques v_1, v_2, \dots, v_L transportées par chacune des N_E fibres d'entrée , et de générer $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux parallèles de caractéristiques optiques adaptées et disposés en matrices de N_E colonnes et de L lignes, chaque ligne étant attachée à une même variable optique v_i .

- grâce au routeur point à point 150 de réorienter à l'intérieur de chacune des L lignes, chacun des N_E faisceaux lumineux attaché à la même variable optique v_i et de générer en sortie du routeur, L lignes d'au moins $N_S = N_E$ faisceaux potentiels parallèles.

- grâce au multiplexeur 80 de rassembler ces L lignes en une seule et de réinjecter à nouveau L variables optiques dans une quelconque des fibres de sortie disposées en barrettes et dont le nombre N_S est au moins égal à N_E .

- un dispositif dit routeur démultiplexeur- multiplexeur de variables optiques du type précité caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs 70 et les multiplexeurs 80 utilisés réalisés en optique intégrée sont de type AWG,140.

- un dispositif dit routeur démultiplexeur- multiplexeur de variables optiques du type précité caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs 70 et les multiplexeurs 80 utilisés réalisés en optique espace libre sont de type de celui décrit plus haut.

- un dispositif dit routeur démultiplexeur- multiplexeur généralisé de variables optiques caractérisé, comme ci-dessus, par l'introduction à l'entrée et à la sortie du routeur point à point décrit plus haut, d'un composant de démultiplexage 70 des variables optiques considérées (longueurs d'ondes, longueurs des impulsions lumineuses, états de polarisation ...) à l'entrée et de multiplexage 80 des mêmes variables en sortie mais dans lequel :

- le démultiplexeur 70 permet comme ci-dessus de séparer spatialement les L variables optiques v_1, v_2, \dots, v_L transportées par chacune des N_E fibres d'entrée, et de générer $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux parallèles 112 de caractéristiques optiques adaptées et disposés en matrices de N_E colonnes et de L lignes, chaque ligne étant attachée à une même variable optique v_i .
- le routeur point à point 150 permet de réorienter à l'intérieur de chacune des L lignes, chacun des N_E faisceaux lumineux attachés à la même variable optique v_i et de générer en sortie, L lignes d'au moins $N_S = L \cdot N_E$ faisceaux potentiels parallèles (au lieu d'au moins N_E avec le routeur point à point précité).
- le multiplexeur 80 permet de rassembler ces L lignes en une seule et de réinjecter dans une quelconque des fibres de sortie disposées en barrettes et dont le nombre N_S est au moins égal à $L \cdot N_E$, un nombre quelconque de canaux attachés aux différentes variables optiques v_i compris entre 1 et L (au lieu de L avec le routeur point à point précité).

- un dispositif dit routeur démultiplexeur- multiplexeur généralisé de variables optiques du type précité caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs 70 et les multiplexeurs 80 utilisés réalisés en optique intégrée sont de type AWG 140.

- un dispositif dit routeur-démultiplexeur- multiplexeur généralisé de variables optiques du type précité caractérisé en ce que la variable optique

considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs 70 et les multiplexeurs 80 utilisés réalisés en optique espace libre sont de type de celui décrit ci-dessus.

- un dispositif de routage optique d'un quelconque type précité, caractérisé par l'introduction de moyens de contrôle de fonctionnement 90 placés en sortie de chacun des moyens de déflexion des différents modules (MAPA) mis en jeu, ou seulement en sortie de quelques moyens de déflexion particulier (comme par exemple le dernier moyen MD^{NE} du sous-système de déflexion d'entrée du routeur et le premier moyen MD^{1S} du sous-système de sortie du routeur), et comportant:

- des moyens de séparation spatiale 160 ou 161 permettant de prélever une fraction de la puissance lumineuse des faisceaux optiques de signal défléchis par les différents moyens de déflexion ou une fraction de la puissance lumineuse de faisceaux optiques annexes superposés aux faisceaux de signal.
- des moyens optiques d'imagerie 164 permettant de transformer de manière bi-univoque les différentes positions de déflexion angulaire en autant de positions spatiales ; ces moyens optiques d'imagerie étant groupés suivant des configurations identiques à celles des moyens de déflexion (barrettes ou matrices d'éléments);
- des moyens de détection 165 des positions spatiales ainsi formées comportant un nombre de points au moins égal au nombre total de positions angulaires générées au niveau de l'étage de contrôle considéré ; la configuration des points du photodétecteur étant homothétique de celle de l'ensemble des positions de déflexion angulaire à contrôler. Ces moyens de détection peuvent être favorablement des barrettes ou des matrices de photodétecteurs CMOS disponibles commercialement .
- éventuellement des moyens optiques d'adaptation d'image 166 pour adapter les dimensions des composants mis en jeu par les moyens de contrôle.

- un dispositif du type précité caractérisé par le fait que les positions des 'waist' des faisceaux gaussiens mis en jeu au cours des différentes

conjugaisons optiques 'objet-image' sont localisés au niveaux des éléments des différents moyens de déflexion.

- un dispositif du type précité caractérisé par l'insertion dans le module de mise en forme des faisceaux d'une barrette ou d'une matrice de micro-lentilles de transport permettant de déporter la position des 'waist' donnée par les différentes lentilles de collimation .

Ces moyens de contrôle 90 sont décrits en détail dans la demande de brevet déposée le même jour.

5. REFERENCES

' Fully provisioned 112 x 112 micro-mechanical optical crossconnect with 35.8 Tb/s demonstrated capacity ', D.T Neilson et al , Optical , Fiber Communication Conférence , OFC 2000 , Post dead line papers , paper PD12 , Baltimore , Mach 7 - 10 , 2000 .

' Optical MEMS answer high-speed networking requirements ', Electronics Design , April 5 , 1999 .

' Laser Focus World ', January 2000 , 127 - 129 .

' Technologies et Stratégies ', numéro 20 , Février - Avril 2000 .

REVENDICATIONS

1. Dispositif de routage optique permettant de coupler chacune d'une pluralité de N_E voies d'arrivée optique (1) à l'une quelconque d'une pluralité de N_S voies de sortie optique (5) et orienter chacun des faisceaux optiques arrivant par les voies d'arrivée optique vers l'une quelconque des N_S voies de sortie optique, comportant :

- un module d'entrée (40) ayant N_E entrées optiques, apte à mettre en forme chacun des faisceaux arrivant par les voies d'arrivée optique, de façon à obtenir une pluralité de faisceaux optiques mis en forme (112),
- un module de déflexion d'entrée (30) apte à générer pour chacune des entrées un nombre P_{TN} de positions de déflexion angulaire distinctes au moins égal au nombre N_S de voies de sortie optiques,
- un module de liaison (50) apte à rassembler de façon bi-univoque sur P_{TN} points de focalisation spatiale, respectivement, les P_{TN} positions de déflexion angulaire de chacune des entrées, ce module étant apte à générer P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires,
- un module de déflexion de sortie (35) ayant P_{TN} entrées aptes à intercepter les P_{TN} faisceaux optiques intermédiaires, et apte à générer, à partir des faisceaux optiques intermédiaires, N_S faisceaux de sortie, et
- un module de sortie optique (45) apte à mettre en forme chacun des N_S faisceaux de sortie en sorte de pouvoir les appliquer aux N_S voies de sortie.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les voies d'entrée (1) et les voies de sortie (5) sont parallèles.

3. Dispositif selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel le module de déflexion d'entrée (30) comporte N_E lignes comportant chacune une pluralité d'éléments de déflexion disposés en cascade et pouvant prendre chacun une pluralité de configurations de déflexion angulaire en nombre inférieur au nombre P_{TN} .

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le module de déflexion de sortie (35) comporte N_S lignes comportant chacune une pluralité d'éléments de déflexion en cascade pouvant prendre une

pluralité de configurations de déflexion angulaire en nombre inférieur au nombre N_s .

5. Dispositif selon la revendication 3 ou la revendication 4, caractérisé en ce que, dans chaque ligne, chaque élément de déflexion (MD) est couplé au précédent par un élément de conjugaison optique (MCO) apte à réaliser une conjugaison objet-image entre cet élément de déflexion et le précédent.

6. Dispositif selon la revendication 5, dans lequel chaque élément de conjugaison optique a un un grossissement :

$$G_{i,i+1} = P_i \cdot (P_{i+1} - 1) / (P_i - 1)$$

où P_i et P_{i+1} représentent le nombre de positions angulaires pouvant être prises par les éléments de déflexion i et $i+1$ entre lesquels cet élément de conjugaison optique est disposé.

7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel, dans au moins une ligne, les éléments de déflexion optique ont un même nombre de positions angulaires, et le grossissement est égal à ce nombre.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 3 à 7, dans lequel les éléments de déflexion sont des miroirs orientables au moins autour d'un axe de basculement.

9. Dispositif selon la l'une quelconque des revendications 3 à 8, dans lequel les éléments de déflexion angulaire homologues au sein des lignes sont répartis en une pluralité d'ensembles en nombre égal au nombre d'entrées optiques.

10. Dispositif selon la revendication 9, dans lequel les ensembles ont des axes optiques parallèles.

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel le module de liaison (50) comporte un élément de focalisation (55) réfractif (lentille) ou réfléchissant (miroir) permettant de regrouper l'ensemble des $P_{TN} \cdot N_E$ faisceaux en P_{TN} points de focalisation spatiale dans un unique plan focal image (52).

12. Dispositif selon la revendication 11, dans lequel les N_E sorties du module de déflexion d'entrée (30) sont situées dans le plan focal objet (51) de l'élément de focalisation du module de liaison (50) et les entrées du module de déflexion de sortie (35) sont situées dans le plan focal image de ce module de liaison.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 12 dans lequel le module de liaison (50) comporte des éléments optiques d'augmentation (56) et de diminution (57) des écarts angulaires entre les P_{TN} positions de déflexion angulaire respectivement générées par chacune des sorties du module de déflexion d'entrée.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 13 dans lequel le module de liaison (50) comporte une lentille de focalisation et un miroir de renvoi (300) dont le plan focal image F_{IM} est confondu avec le plan focal image (52) de cette lentille de focalisation.

15. Dispositif selon la revendication 14, ayant une configuration repliée dans laquelle sont utilisées de mêmes matrices d'éléments pour les modules de déflexion d'entrée et de sortie, une moitié des éléments des matrices étant mise en jeu pour le module de déflexion d'entrée, l'autre moitié, symétrique par rapport au centre des différentes matrices, étant mise en jeu pour le module de déflexion de sortie.

16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, dans lequel les modules comportent des éléments optiques disposés en barrettes ou en matrices.

17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel les modules comportent des éléments optiques de type micro-lentilles ou micro-miroirs pouvant être réalisés par les procédés de fabrication collective mis en jeu dans les micro-technologies.

18. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 17, dans lequel les éléments de déflexion d'entrée ou de sortie comportent des barrettes ou de matrices d'éléments miroirs individuellement adressables électriquement et situés dans des plans parallèles éventuellement inclinés en moyenne par rapport à l'axe optique général.

19. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, dans lequel le module de liaison (50) a une configuration repliée et comporte des éléments optiques de basculement angulaire (58) et (59) permettant de rassembler les différents faisceaux potentiellement défléchis des sorties du module de déflexion d'entrée dans un plan perpendiculaire à l'axe optique général puis d'opérer l'opération inverse sur les différents faisceaux de façon à les orienter sur chacune des entrées du module de déflexion de sortie.

20. Dispositif selon la revendication 19, dans lequel le module de liaison comporte un élément de focalisation (55) de type réfractif pouvant travailler dans une configuration perpendiculaire à l'axe optique général.

21. Dispositif selon la revendication 19 ou la revendication 20, dans lequel les moyens de basculement (58) et (59) comportent des barrettes ou des matrices de micro-lentilles ou de micro miroirs dont la focale des différents éléments est calculée pour que chacune des conjugaisons optiques mises en jeu présente le même grossissement.

22. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 19 à 21 dans lequel les éléments de basculement angulaire (58) et (59) constituent des éléments d'augmentation (56) et de diminution (57) des écarts angulaires entre les faisceaux défléchis potentiels mis en jeu.

23. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, comportant, avant le module de déflexion d'entrée, un composant diviseur (60) permettant de partager en K parties égales ou inégales la puissance lumineuse de chacune des voies d'entrée et de disposer d'une matrice de $K \cdot N_E$ faisceaux lumineux (112), chacun pouvant être orienté vers l'une quelconque des voies de sortie dont le nombre N_S est au moins égal à $K \cdot N_E$.

24. Dispositif selon la revendication 23, dans lequel le composant diviseur est réalisé en optique intégrée.

25. Dispositif selon la revendication 23, dans lequel les composants diviseurs sont réalisés en optique espace libre et comprennent :

- une première barrette (61) de N_E moyens de collimation (micro-lentilles ou micro-miroirs) qui permet de collimater les N_E

faisceaux lumineux issus de chacune des voies optiques d'entrée (1) dans la direction de l'axe de la barrette,

- une seconde barrette (62) de N_E moyens de collimation réfléchissants ou réfractifs permettant de collimater les N_E lignes de lumière formées,
- une matrice (63) de $K \cdot N_E$ éléments optiques réfractifs ou réfléchissants de mise en forme permettant de générer, à partir des N_E lignes de lumière, $K \cdot N_E$ faisceaux lumineux (112) de caractéristiques optiques adaptées au module de déflexion d'entrée.

26. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, comportant, avant le module de déflexion d'entrée, un composant démultiplexeur (70) permettant de séparer L variables optiques pouvant être utilisées comme support d'informations transportées, la connexion de ce composant avec chacune des voies optiques d'une barrette de N_E fibres optiques d'entrée 1 permettant de générer $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux (112) appliqués au module de déflexion d'entrée, le nombre N_S étant au moins égal à $L \cdot N_E$.

27. Dispositif selon la revendication 26, dans lequel le composant démultiplexeur (70) est réalisé en optique intégrée.

28. Dispositif selon la revendication 26 ou la revendication 27, dans lequel le composant est apte à séparer la longueur d'onde lumineuse λ et est réalisé en optique intégrée.

29. Dispositif selon la revendication 26 ou la revendication 27, dans lequel le composant est apte à séparer la longueur d'onde lumineuse λ et est réalisé en optique espace libre et comprend :

- une première barrette (71) de N_E moyens de collimation (micro-lentilles ou micro-miroirs) qui permet de collimater les N_E faisceaux lumineux issus de chacune des voies optiques d'entrée (1) avec l'ouverture angulaire adaptée,
- une barrette (72) de réseaux de diffraction comportant des traits orientés parallèlement à l'axe de la barrette de voies d'entrée (1) et permettant de séparer spatialement différentes longueurs d'ondes $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ transportées

par chacune des N_E voies optiques d'entrée, la barrette de réseaux étant inclinée par rapport à des plans perpendiculaires à l'axe optique du système d'un angle dépendant de l'ouverture angulaire des faisceaux lumineux incidents et de l'écart des longueurs d'ondes des faisceaux adjacents diffractés par le réseau,

- une barrette (74) de moyens optiques permettant de réorienter suivant des ^{directions} parallèles chacun des L faisceaux lumineux de longueur d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ attachés à chacune des N_E voies optiques d'entrée et générés par le réseau de diffraction,

- une matrice de moyens optiques réfractifs ou réflectifs de mise en forme disposés en N_E colonnes et L lignes et permettant éventuellement d'adapter les caractéristiques optiques des $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux (112) obtenues au module de déflexion d'entrée.

30. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, comportant, respectivement avant le module de déflexion d'entrée et après le module de déflexion de sortie, un composant de démultiplexage (70) de variables optiques en entrée, et un composant de multiplexage (80) des mêmes variables en sortie.

31. Dispositif selon la revendication 30, caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs (70) et les multiplexeurs (80) utilisés sont réalisés en optique intégrée.

32. Dispositif selon la revendication 30, caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et que les démultiplexeurs 70 et les multiplexeurs 80 utilisés sont réalisés en optique espace libre.

33. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, apte au démultiplexage-multiplexage de variables optiques caractérisé par la présence, d'un composant de démultiplexage de ces variables avant le module de déflexion d'entrée, et d'un composant de multiplexage de ces variables après le module de déflexion de sortie, et par le fait que :

- le démultiplexeur (70) permet de séparer spatialement L variables optiques v_1, v_2, \dots, v_L transportées par chacune des N_E voies d'entrée, et de générer $L \cdot N_E$ faisceaux lumineux parallèles (112) de caractéristiques optiques

adaptées et disposés en matrices de N_E colonnes et de L lignes, chaque ligne étant attachée à une même variable optique v_i ,

- permet de réorienter, à l'intérieur de chacune des L lignes, chacun des N_E faisceaux lumineux attachés à la même variable optique v_i et de générer, en sortie du module de déflexion de sortie, L lignes d'au moins $NS = L * N_E$ faisceaux potentiels.

- le multiplexeur (80) permet de rassembler ces L lignes en une seule et de réinjecter dans une quelconque des voies de sortie disposées en barrettes et dont le nombre N_S est au moins égal à $L * N_E$, un nombre quelconque de canaux attachés aux différentes variables optiques v_i compris entre 1 et L .

34. Dispositif selon la revendication 33, caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et en ce que les démultiplexeurs (70) et les multiplexeurs (80) utilisés sont réalisés en optique intégrée.

35. Dispositif selon la revendication 33, caractérisé en ce que la variable optique considérée est la longueur d'onde λ et en ce que les démultiplexeurs (70) et les multiplexeurs (80) utilisés sont réalisés en optique espace libre.

36. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 35, dans lequel des éléments de contrôle de fonctionnement sont placés en sortie d'une partie au moins du module de déflexion d'entrée ou du module de sortie, ces éléments de contrôle comportant des éléments de séparation spatiale permettant de prélever une partie des faisceaux.

37. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 36, caractérisé par le fait que les faisceaux mis en jeu au cours des différentes conjugaisons optiques 'objet-image' ont des « waist » dont les positions sont localisées au niveau des éléments des différents éléments de déflexion.

38. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 37, caractérisé en ce que des lentilles de collimation donnent aux faisceaux un « waist » et en ce qu'un module de mise en forme des faisceaux d'une barrette

ou d'une matrice de micro-lentilles de transport est prévu, qui permet de déporter la position des « waist ».

39. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 38, caractérisé en ce que les voies d'entrée et de sortie sont des fibres.

FIG.1

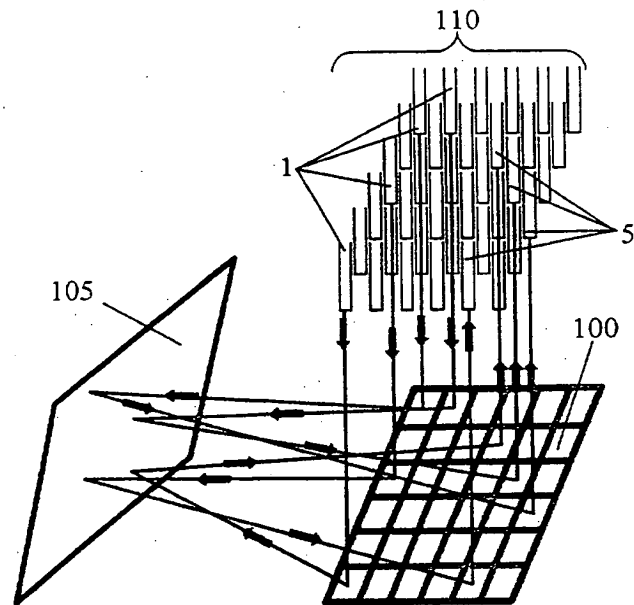
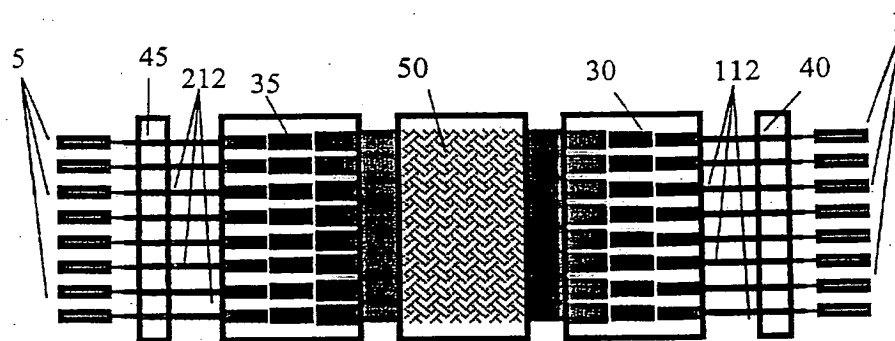


FIG.2



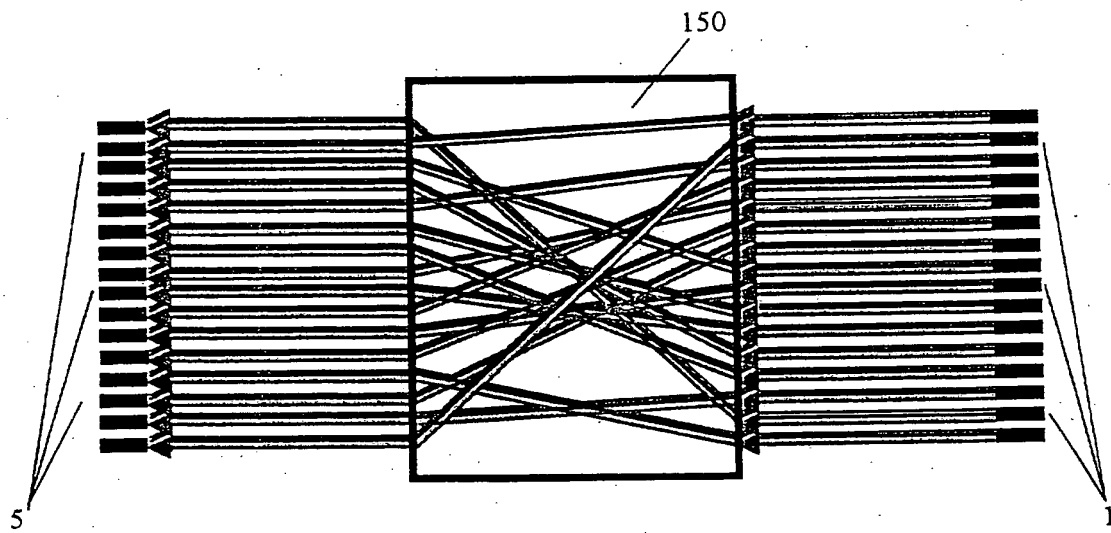


FIG. 3a

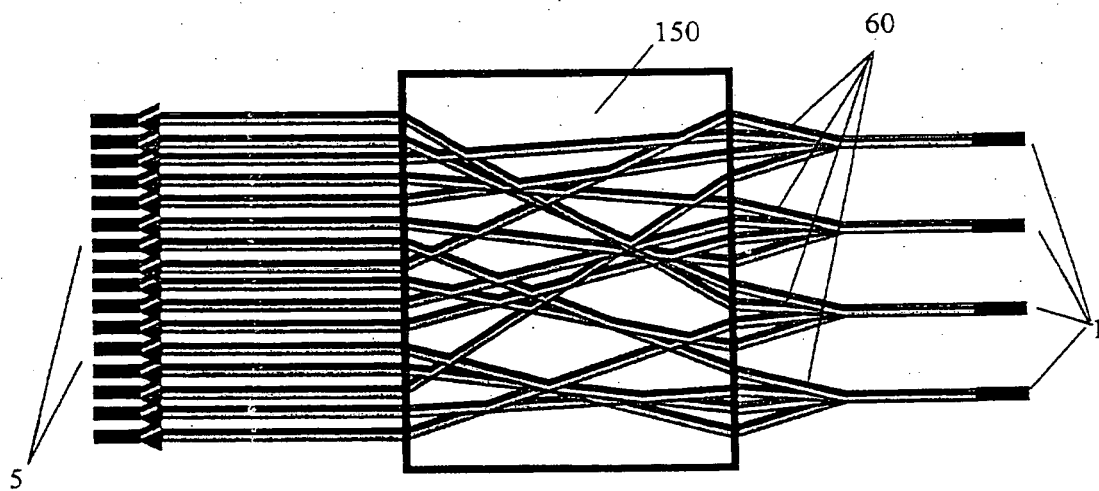
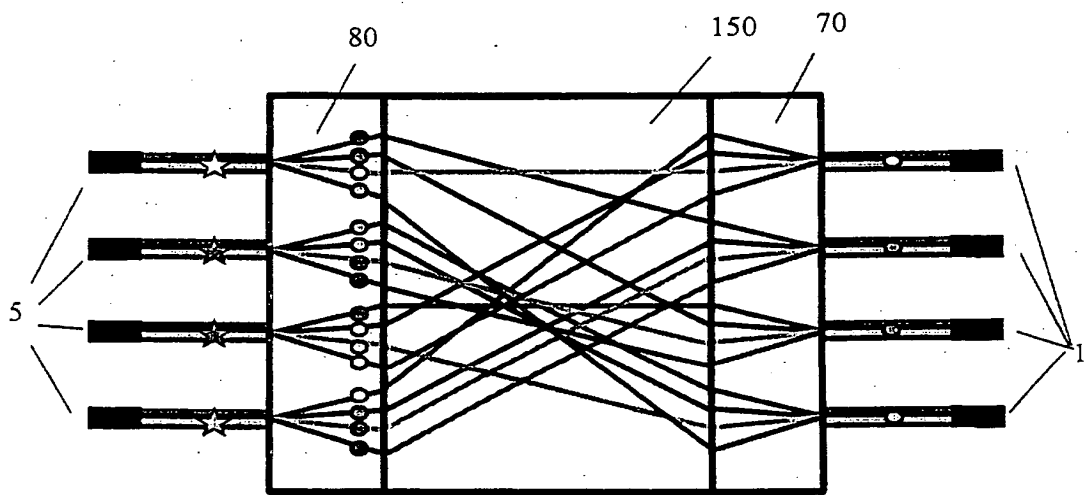
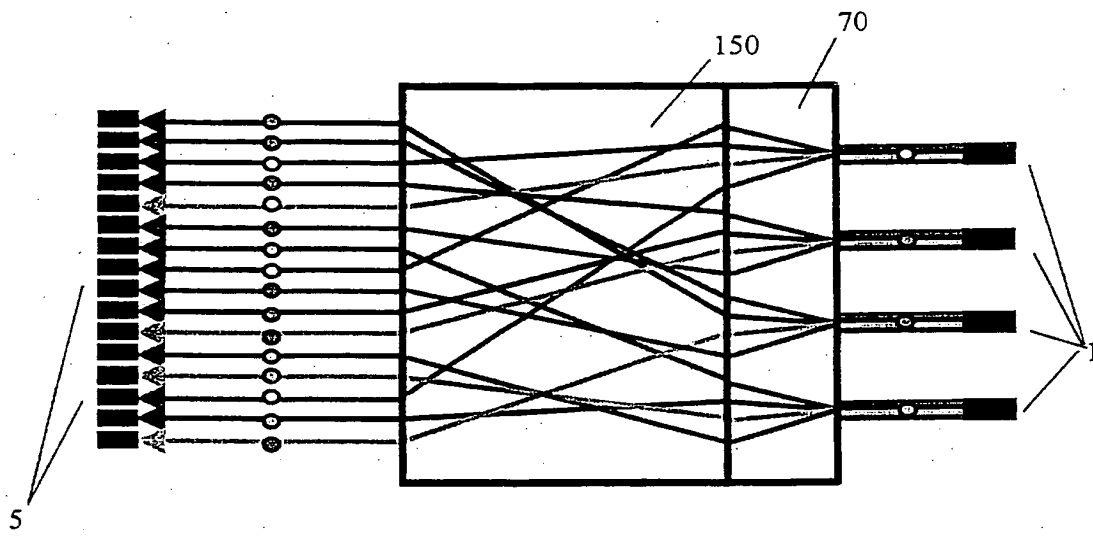


FIG. 3b



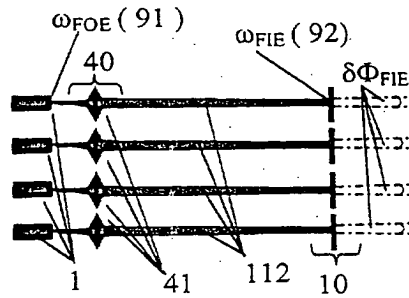


FIG. 4a

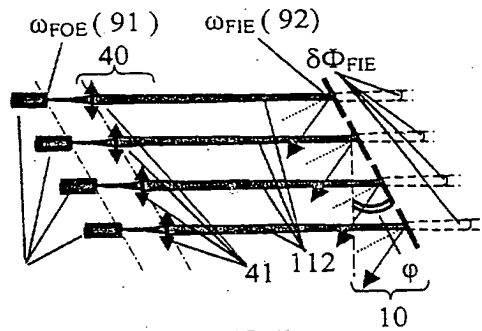


FIG. 4b

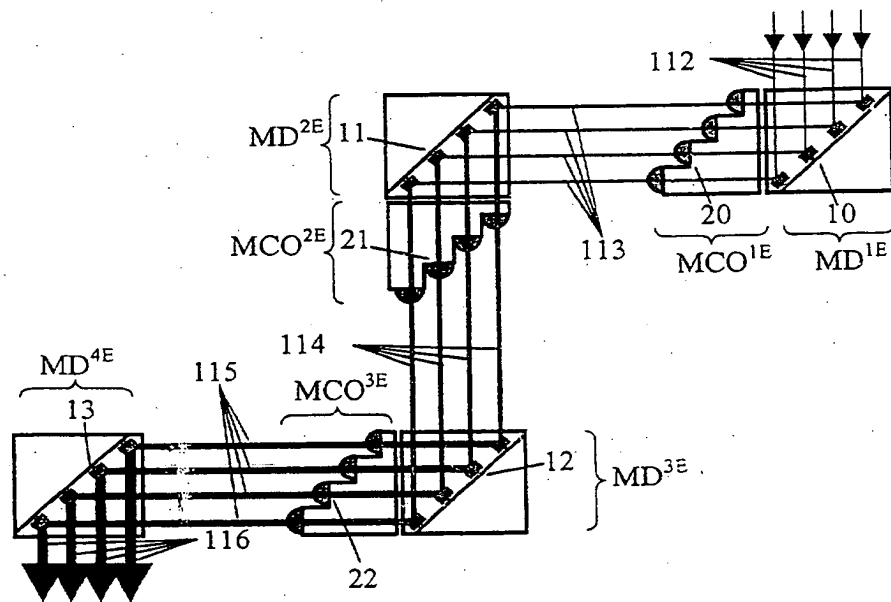


FIG. 5

FIG. 6a

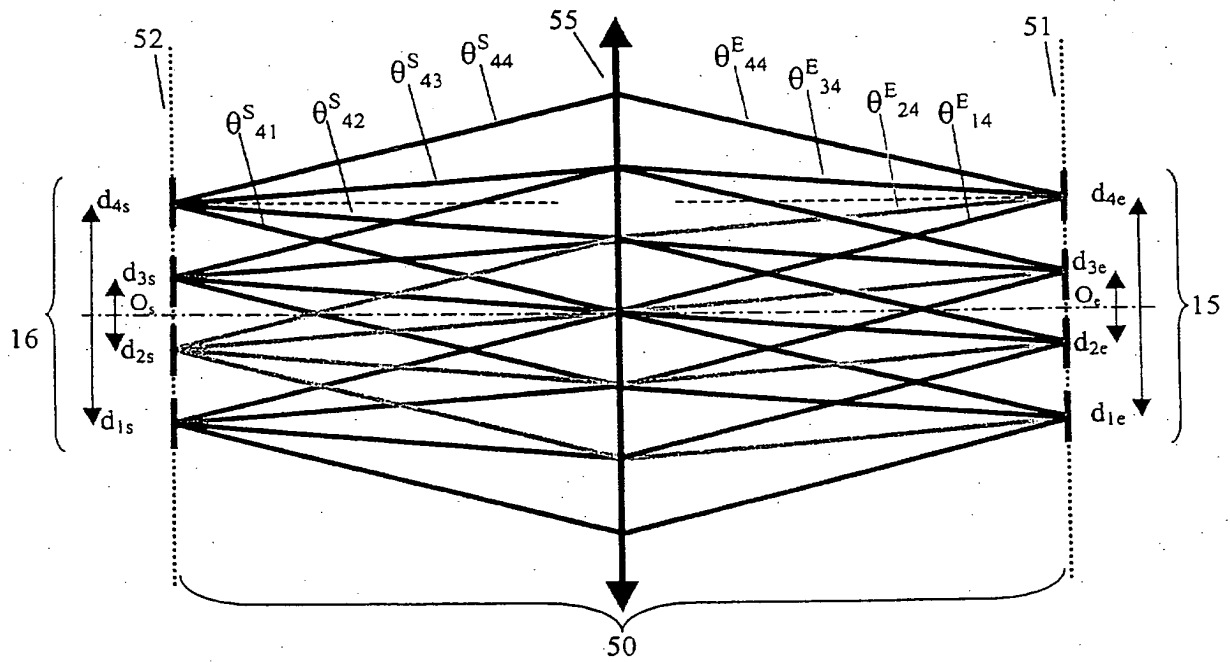


FIG. 6b

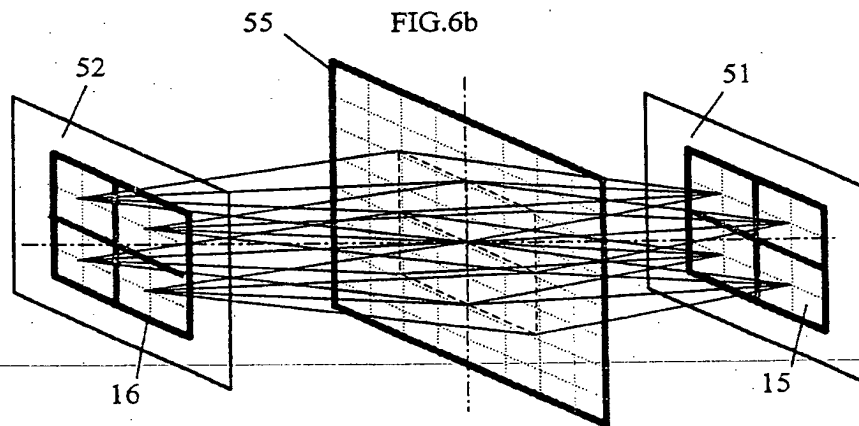
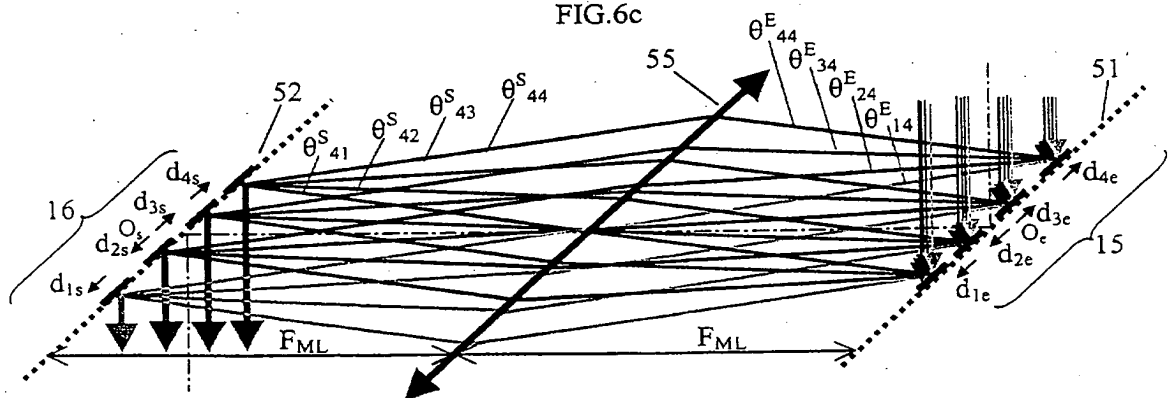


FIG. 6c



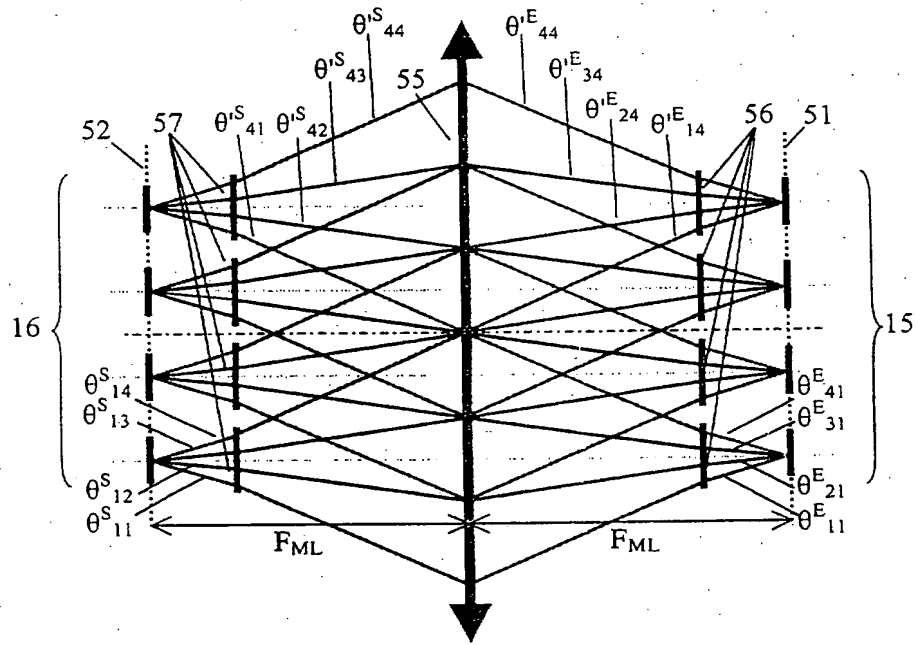


FIG. 6d

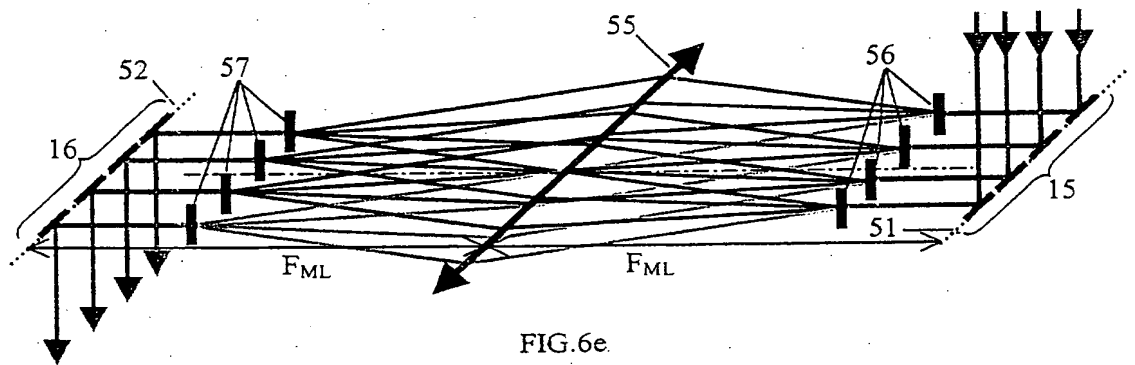


FIG. 6e

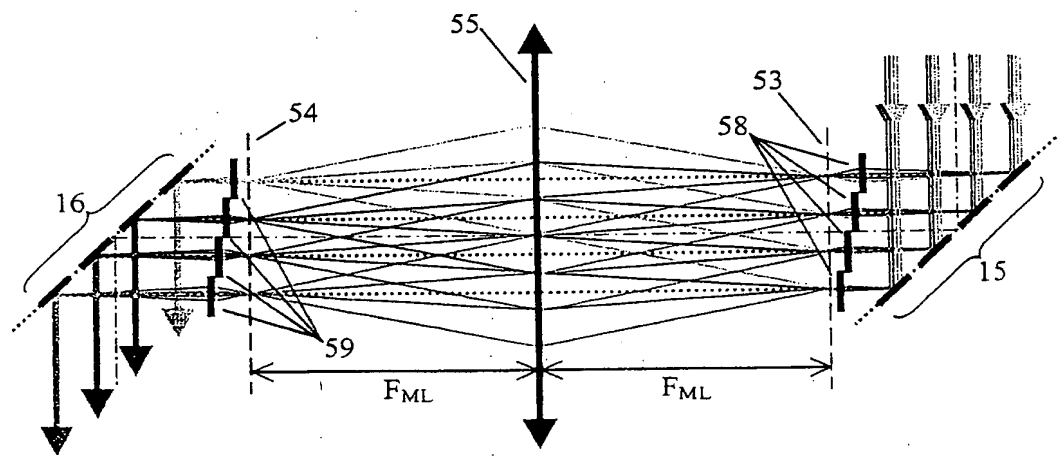


FIG. 6f

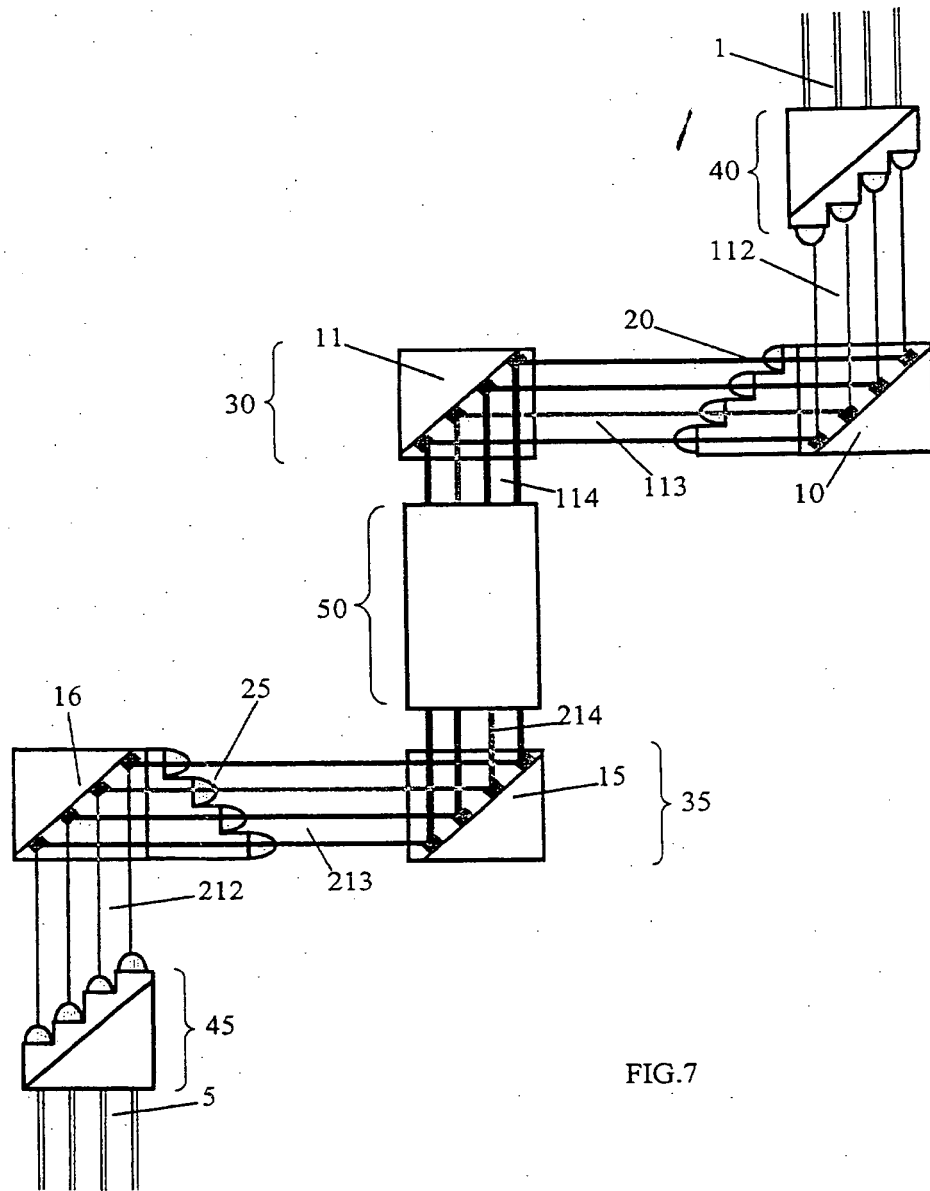


FIG. 7

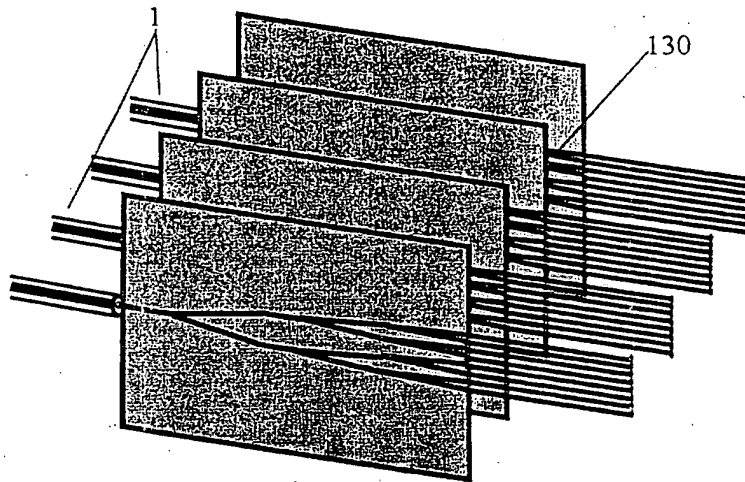


FIG. 8

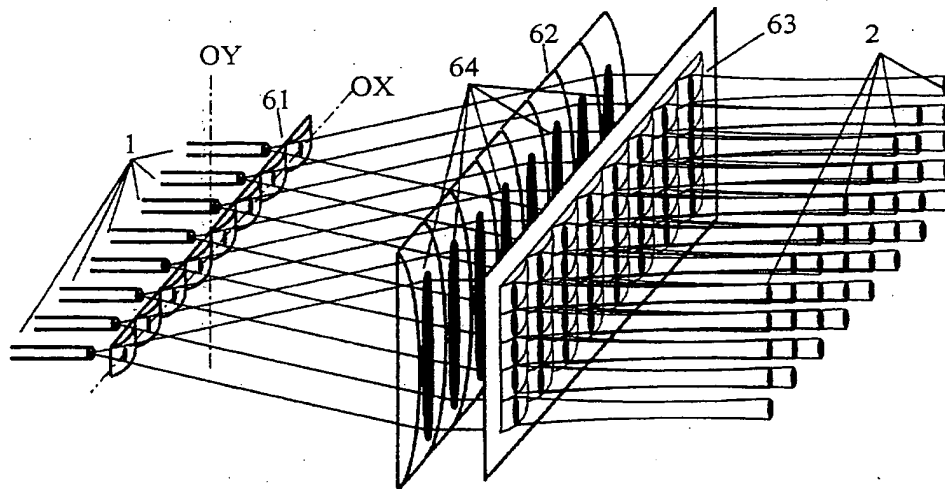


FIG. 9

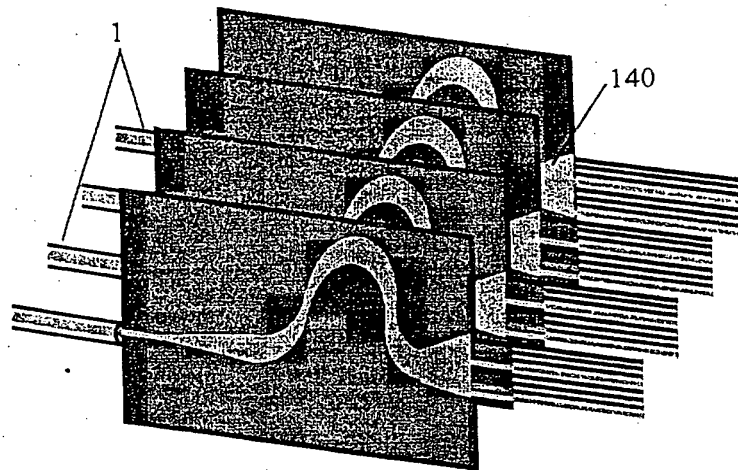


FIG. 10

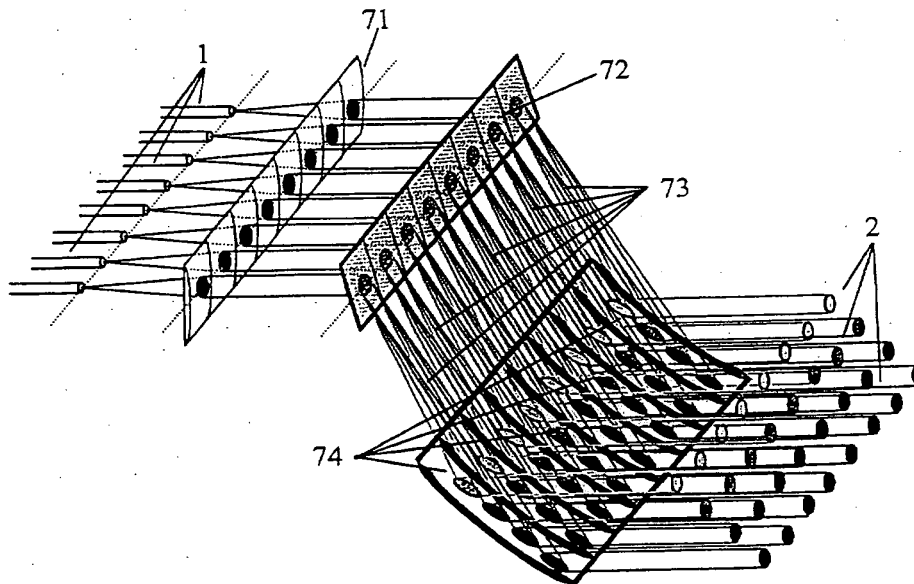


FIG. 11

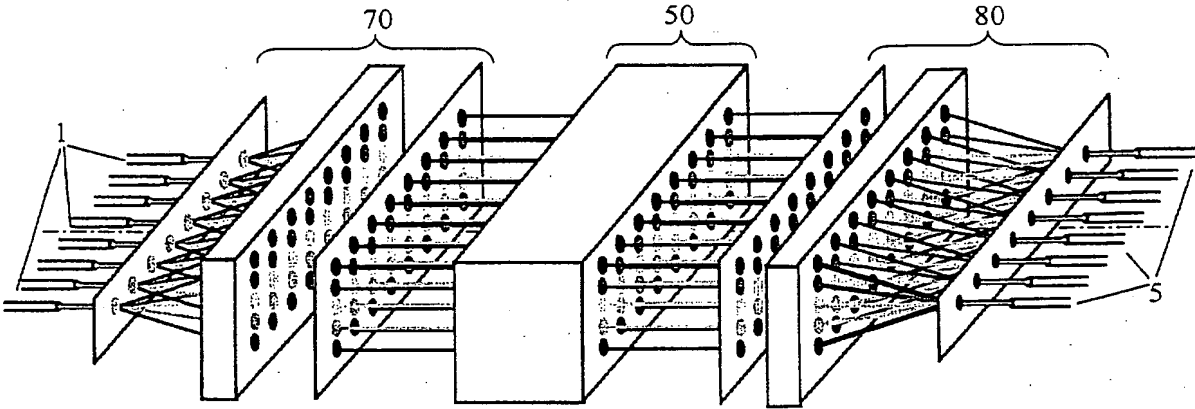


FIG.12

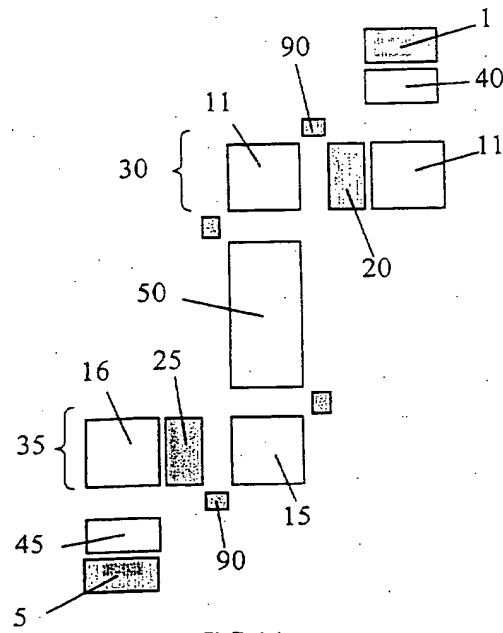


FIG. 14a

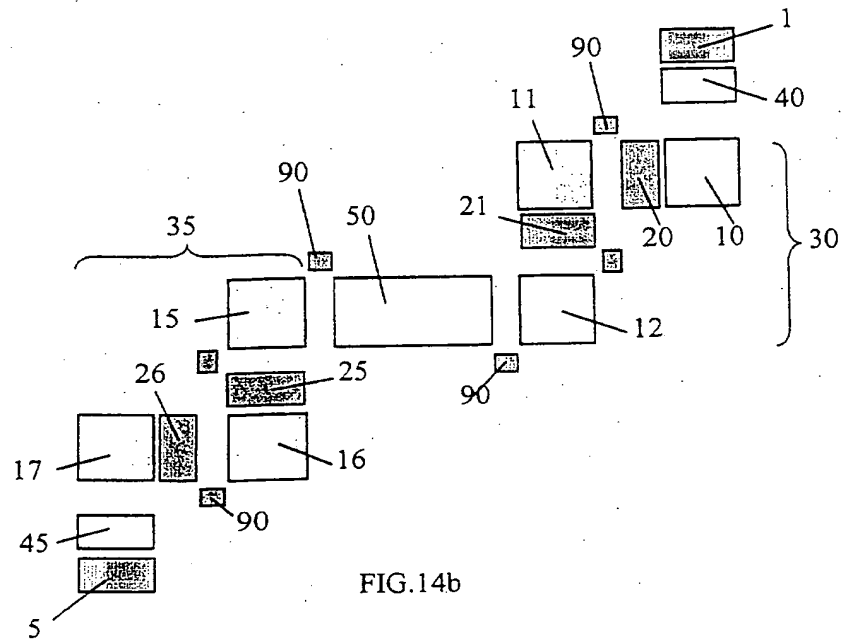


FIG. 14b

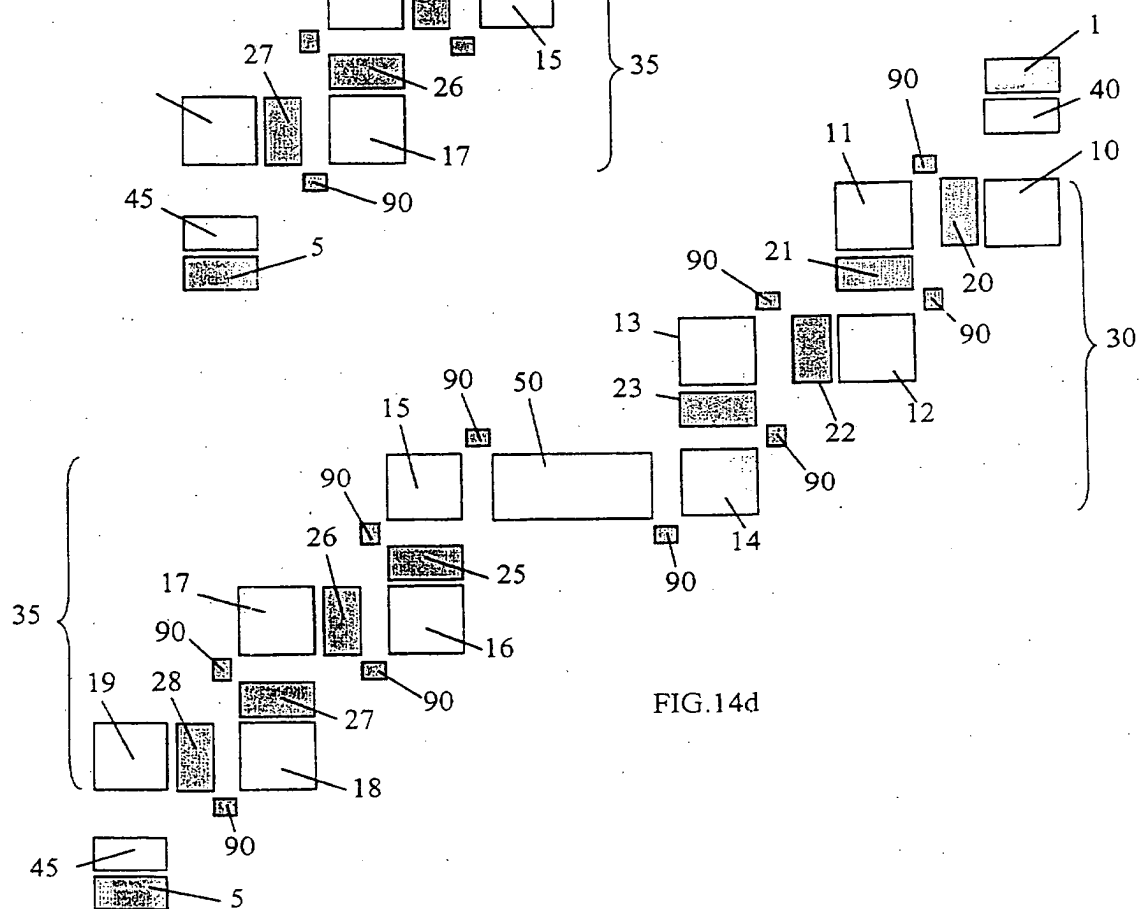
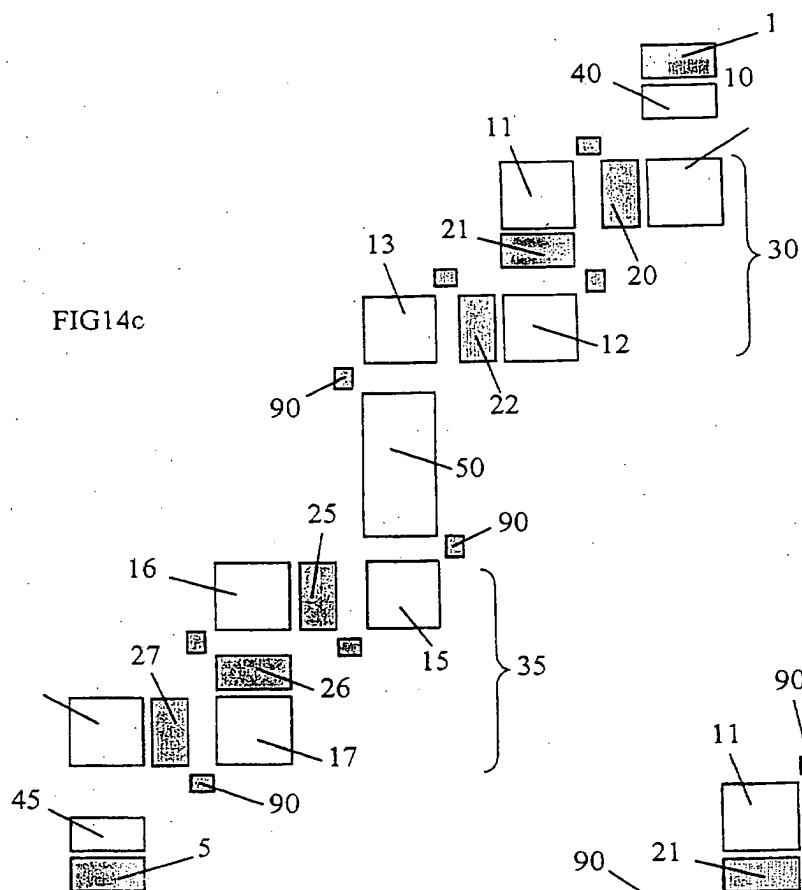


FIG15

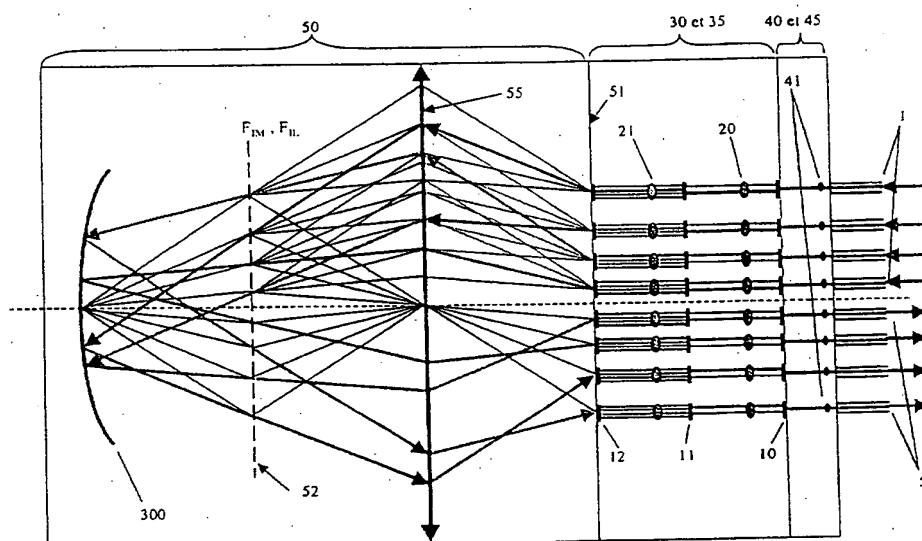
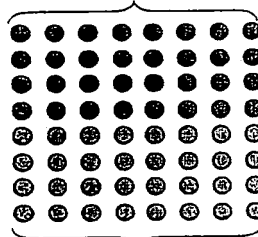


FIG.16

Eléments
d'entréeEléments de
sortie

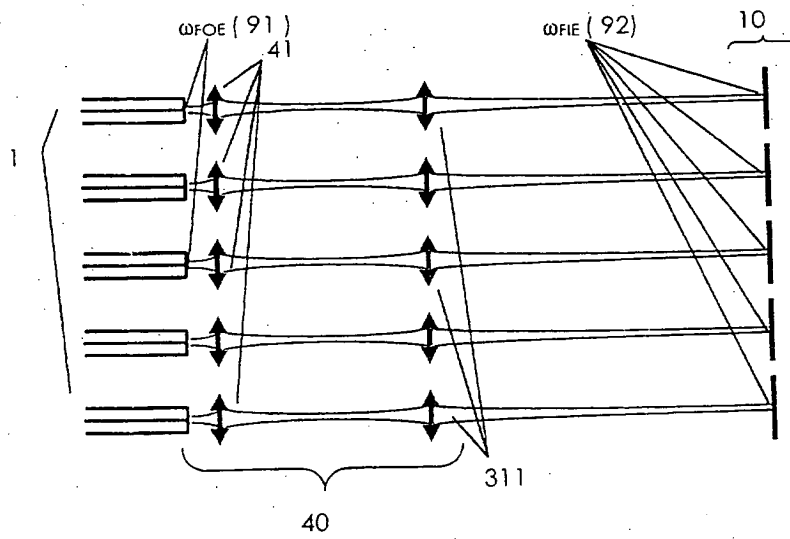


FIG.17

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☒ FADED TEXT OR DRAWING

☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.